



République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Electrique

Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par

MOUGAY Abdallah

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat LMD en Electrotechnique

Option : Systèmes d'énergie électrique

Intitulé de la thèse

Gestion de l'énergie dans un système d'alimentation multi-sources photovoltaïque/groupe électrogène destiné à un site de télécommunications isolé

Présentée devant le jury composé de :

Pr. SAYAH Houari
Pr. KHATIR Mohamed
Dr. DAHOU Omar
Dr. BRAHAMI Mohammed Nadjib
Pr. ZIDI Sid-Ahmed

Professeur
Professeur
MCA
MCA
Professeur

(U.D.L. Sidi Bel-Abbès)
(U.D.L. Sidi Bel-Abbès)
(U.M.S. Mascara)
(U.D.L. Sidi Bel-Abbès)
(U.D.L. Sidi Bel-Abbès)

Président
Directeur de thèse
Examineur
Examineur
Invité

Soutenue le : / / 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

In the name of Allah, the Beneficent, the Merciful

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A la mémoire de mon père.

A ma chère mère

A mes frères

A toute ma famille.

À tous mes amis et mes collègues...

Mouqay Abdallah

Remerciements

Je remercie **ALLAH le Tout-puissant** de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme cette thèse de doctorat.

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mon directeur de thèse, **Professeur KHATIR MOHAMED**, pour toute son aide. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie, car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères au **Professeur SAYAH Houari**, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de ma soutenance.

Je tiens à remercier également, les membres du jury : Monsieur **DAHOU Omar** Maître de conférences à l'université Mustapha Stambouli de Mascara et à Monsieur **BRAHAMI Mohammed Nadjib**, Maître de conférences à l'université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, pour l'honneur qu'ils me font et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux en examinant ce travail.

Je remercie encore le **professeur ZIDI Sid-Ahmed**, Professeur à l'université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes pour ses conseils et son aide.

Enfin, je tiens aussi à remercier tous les enseignants de la faculté de Génie Electrique, et tous les membres du **laboratoire ICEPS de l'université Djillali Liabes**, et toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études et notamment ces années de thèse.

Mougay Abdallah

Publications et communications

▪ **Publication internationale**

- [1] **Abdallah Mougay, Mohamed Khatir, Mohamed Flitti, Sid-Ahmed Zidi, Ahmed Ganoune.**, « Energy management for a new power system configuration of base transceiver station (BTS) destined to remote and isolated areas », Przegląd Elektrotechniczny, 2021, Vol. 21, No. 8 , pp : 01-08

▪ **Communication internationale**

- [1] **Abdallah Mougay, Mohamed Khatir, Sid-Ahmed Zidi.**, « Study and sizing a photovoltaic generator intended to a telecommunications site », The 3rd International Conference on Power Electronics and their Applications. At: Faculty of Science and Technology, University Djelfa on 16-17 September 2017, Algeria
- [2] **Abdallah Mougay, Mohamed Khatir, Sid-Ahmed Zidi.**, « Dimensioning and optimization of a hybrid system photovoltaic and generator », ICCEE'18 International conference on communications and electrical engineering. December 17- 18, 2018 El-Oued, Algeria.

Résumé

Jusqu'à présent, la majorité des sites de télécommunications isolés en Algérie sont alimentés exclusivement par des générateurs diesel. Cette source de production présente plusieurs inconvénients tels que l'émission de gaz à effet de serre, le prix des combustibles ainsi que la pollution. L'emplacement des sites isolés ainsi que leurs caractéristiques géographiques et climatiques justifient leur isolation du réseau principale. Malgré ces inconvénients, le générateur diesel a été le plus utilisé compte tenu de sa disponibilité et de sa fiabilité. Ainsi la combinaison des sources d'énergies renouvelables avec le générateur diesel aurait un impact positif sur l'environnement et le coût de la production de l'énergie. Néanmoins, cette solution nécessite des algorithmes de contrôle assez sophistiqués, car les différentes sources d'énergie fonctionnent en parallèle. Dans ce travail, le système étudié se compose d'un générateur diesel, un système de stockage et un générateur photovoltaïque. Une stratégie de gestion de puissance entre les différents générateurs a été utilisée, pour atteindre de hautes performances de gestion de l'énergie. Un algorithme de contrôle a été développé pour gérer l'écoulement de puissance entre les différents éléments du système, tout en réduisant l'utilisation des générateurs diesel. Une nouvelle configuration du système d'alimentation du site isolé a été proposée pour compenser les dépenses entraînées par l'installation du générateur PV. La performance du système proposé a été testée et validée en utilisant HOMER et MATLAB.

Mots-clés : Gestion de l'énergie, Système hybride, Station de base (BTS), Système photovoltaïque, Générateur diesel, Véhicule électrique.

Abstract

Until now, the majority of remote telecommunications sites in Algeria are powered exclusively by diesel generators. This source of production has several disadvantages such as the emission of greenhouse gases, the price of fuels and pollution. The location of isolated sites as well as their geographical and climatic characteristics justify their isolation from the main network. Despite these disadvantages, the diesel generator has been used the most given its availability and reliability. Thus the combination of renewable energy sources with the diesel generator would have a positive impact on the environment and the cost of energy production. However, this

solution requires quite sophisticated control algorithms, since the different energy sources operate in parallel. In this work, the studied system consists of a diesel generator, a storage system and a photovoltaic generator. A power management strategy between the different generators has been used, to achieve high energy management performance. A control algorithm has been developed to manage the flow of power between the different elements of the system, while reducing the use of diesel generators. A new configuration of the isolated site power system was proposed to compensate for the expenses incurred by the installation of the PV generator. The performance of the proposed system has been tested and validated using HOMER and MATLAB.

Keywords : Energy management, Hybrid system, Base station (BTS), Photovoltaic system, Diesel generator, Electric vehicle.

Sommaire

Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre I : Architecture et consommation énergétique d'un site de télécommunications

I.1 Introduction	6
I.2 Architecture du réseau De télécommunications.....	7
I.3 Station mobile.....	9
I.4 Sous-système radio : BSS (Base Station Subsystem)	9
I.4.1 Contrôleur de base : BSC (Base Station Controller)	10
I.4.2 BTS	11
I.4.3 Différents types des stations de base (BTS)	12
I.4.3.1 BTS rayonnantes	12
I.4.3.2 BTS ciblées	12
I.4.3.3 Amplificateurs de signal.....	12
I.4.3.4 Shelter.....	13
I.5 Sous système réseau : NSS (Network Switching Subsystem)	14
I.6 Sous-système d'exploitation et de maintenance.....	14
I.6.1 OMC (operating and maintenance center).....	14
I.6.2 NMC (Network Management Center)	15
I.7 Composition et rôle des éléments d'un site de télécommunications	15
I.7.1 Groupe électrogène	16

I.7.2 Batterie.....	16
I.7.3 Onduleur.....	16
I.7.4 Controleur de site	17
I.7.5 Antennes.....	17
I.7.6 BTS (Base Transceiver Station).....	17
I.7.6.1 Baie (Rack)	18
I.7.6.2 Alimentation	19
I.7.6.3 Unité de commande.....	19
I.7.6.4 Carte de communication	19
I.7.6.5 Interface d'émission-réception.....	20
I.7.7 Liaison Abis.....	20
I.8 Consommation énergétique d'un site de télécommunications	21
I.8.1 Architecture du système d'alimentation d'un site de télécommunications	22
I.8.2 Consommation énergétique des différents composants d'un site de télécommunications.....	23
I.8.3 Consommation électrique et classification des stations de télécommunications	23
I.9 Problématique d'alimentation des sites de télécommunications	24
I.9.1 Energie solaire	24
I.9.2 Energie éolienne.....	24
I.9.3 Pico-hydro.....	25
I.9.4 Biodiesel	25
I.9.5 Piles à combustible.....	25
I.10 Conclusions.....	25

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un système hybride pour un site de télécommunications

II.1 Introduction.....	26
II.2 Gisement solaire en Algérie	27
II.3 Présentation des systèmes hybrides.....	28
II.4 Principaux composants des systèmes hybrides	28
II.4.1 Sources d'énergie renouvelables (Générateurs photovoltaïques).....	29
II.4.2 Sources d'énergie conventionnelles	30
II.4.2.1 Système de stockage	30
II.4.2.2 Système de supervision	31
II.4.2.3 Convertisseurs.....	31
II.4.2.4 Charges	32
II.5 Modélisation de la consommation électrique des stations de télécommunications ..	32
II.5.1 Estimation de la consommation électrique de la station de base.....	33
II.5.2 Amplificateur de puissance	34
II.5.3 Unité d'émetteur-récepteur RF.....	35
II.5.4 Unité de traitement en bande de base	36
II.5.5 Bloc d'alimentation.....	36
II.5.6 Unité de refroidissement	36
II.5.7 Unité de backhaul (Unité de liaison)	37
II.6 Modélisation de système hybride PV/diesel	38
II.6.1 Principe	39
II.7 Présentation de système hybride	40
II.7.1 Dimensionnement d'un système de production d'électricité hybride photovoltaïque / groupe électrogène	40
II.7.1.1 Calcul de la puissance crête du champ PV.....	41
II.7.1.1.1 Choix des modules	41

II.7.1.1.2 Calcul du nombre de panneaux photovoltaïques	41
II.7.1.2 Dimensionnement du parc de batteries	42
II.7.1.2.1 Choix de la tension et calcul de la capacité	42
II.7.2 Description de système de simulation	43
II.7.2.1 Le champ photovoltaïque	44
II.7.2.2 Hacheur abaisseur	46
II.7.2.3 Convertisseur VSC	46
II.7.2.4 Redresseur	46
II.8 Scénario	46
II.8.1 Résultats et discussion	47
II.8.1.1 les courbes de tension et le courant avec le rapport cyclique et l'irradiation de système	47
II.8.1.2 Courbe de charge pour site télécommunications	52
II.8.1.3 Profil d'ensoleillement	53
II.8.1.4 Courbe de puissance de la batterie	53
II.8.1.5 Courbe de puissance (PV, CHARGE, BATTERIES)	54
II.9 Conclusions	55

Chapitre III : Optimisation d'un système hybride alimentant un site de télécommunications

III.1 Introduction	56
III.2 Présentation du logiciel HOMER	56
III.3 Optimisation et terminologie	57
III.3.1 Coût actuel net (CAN)	58
III.3.2 Coût nivelé de l'énergie (CNE)	58
III.3.3 Fraction renouvelable (FR)	59
III.4 Présentation du site de télécommunications étudié	59

III.5 Méthodologie du travail	60
III.5.1 Détails de l'énergie radiative du soleil pour le site étudié	61
III.5.2 Profil de charge du site.....	63
III.6 Configurations suggérées pour alimenter un site de télécommunications isolé	65
III.6.1 Configuration de base d'un site de télécommunications isolé	65
III.6.1.1 Détails des groupes électrogènes	65
III.6.1.2 Détails du combustible	66
III.6.1.3 Détails des batteries de stockage	66
III.6.1.4 Détails du convertisseur	66
III.6.1.5 Résultats de la première configuration	67
III.6.2 Deuxième Configuration(01 Groupe électrogène+réseau Sonelgaz)	68
III.6.2.1 Détails du réseau électrique	69
III.6.2.1.1 R.E sans coupure d'électricité	69
III.6.2.1.2 R.E avec des coupures fréquentes	71
III.6.2.1.2 R.E avec des coupures fréquentes	72
III.6.3 Troisième Configuration (PV + groupe électrogène)	73
III.6.3.1 Détails du champ de panneaux photovoltaïques	74
III.6.3.2 Données du contrôle et contraintes du système	75
III.6.3.3 Démarrage des calculs	75
III.6.4 Comparaison entre les résultats des différentes configurations	77
III.6.5 Quatrième configuration(PV+GE+Chargeur de voiture électrique)	78
III.6.5.1 Démarrage des calculs	79
III.7 Conclusions	82

Chapitre IV : Amélioration de l'efficacité énergétique du système d'alimentation d'un site de télécommunications

IV.1 Introduction	83
IV.2 Les principaux aspects des sites de télécommunications	83
IV.3 Alimentation en électricité d'un site de télécommunications	84
IV.4 Présentation du site de télécommunications étudié	85
IV.4.1 Présentation du système d'alimentation hybride	85
IV.5 Généralités sur les véhicules électriques	86
IV.5.1 Classification des véhicules électriques	88
IV.5.1.1 VEs à batteries rechargeables par prise de courant	88
IV.5.1.2 VEs à alimentation par pile à combustible	88
IV.5.2 Description générale de la chaîne de traction	89
IV.5.2.1 Les redresseurs (AC/DC)	89
IV.5.2.2 Les onduleurs (DC-AC)	90
IV.5.2.3 Les hacheurs (DC-DC)	90
IV.5.3 Freinage régénératif	90
IV.5.4 La batterie	90
IV.5.4.1 Les batteries au plomb	91
IV.5.4.2 Les batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd)	91
IV.5.4.3 Les batteries au nickel-hydrure métallique (Ni-MH)	91
IV.5.4.4 Les batteries au lithium	91
IV.6 Chargeur des véhicules électriques	92
IV.6.1 Les chargeurs de type " lents "	92
IV.6.1.1 Chargeur classique	92
IV.6.1.2 Chargeur à coupleur inductif automatique.....	93
IV.6.2 Les chargeurs de type " rapides "	93
IV.6.2.1 Les bornes de recharge	93

IV.6.2.2 Chargeurs à coupleur inductif manuel	94
IV.6.3 Chargeurs filaires	94
IV.7 Simulation d'un système d'alimentation hybride (PV/Diesel avec chargeur de VE)	95
IV.7.1 L'architecture du système hybride	95
IV.7.2 Système d'énergie photovoltaïque	95
IV.7.2.1 Effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques I-V	97
IV.7.2.2 Effet de température sur les caractéristiques I-V	98
IV.7.2.3 Caractéristiques puissance-tension P-V	98
IV.7.3 Système de stockage d'énergie par batterie	99
IV.7.4 Groupe électrogène	100
IV.8 Stratégie de gestion de l'énergie	101
IV.8.1 Cas n°1 : $P_{pv} > P_{ch}$	101
IV.8.2 Cas n°2 : $P_{pv} < P_{ch}$	102
IV.9 Scénario	102
IV.9.1 Résultats et discussion	103
IV.9.1.1 Courbe de charge pour site de télécommunications et véhicules électriques	104
IV.9.1.2 Profil d'ensoleillement.....	104
IV.9.1.3 Courbe de puissance de la batterie	105
IV.9.1.4 Courbe de puissance du groupe électrogène	106
IV.9.2 Comparaison des estimations de disponibilité d'alimentation entre deux architectures respectivement avec et sans stratégie de gestion d'énergie	107
IV.9.2.1 IV Les courbes de puissance du GE avec et sans stratégie de gestion	108
IV.9.2.1 IV Les courbes de puissance de la batterie avec et sans stratégie de gestion	108
IV.12 Conclusions.....	109

Conclusion générale.....	110
Annexes	112
Bibliographie	118

Liste des figures

Chapitre I : Architecture et consommation énergétique d'un site de télécommunications

Figure I.1 : Architecture d'un réseaux de télécommunications	8
Figure I.2 : Le sous-système radio (BSS)	9
Figure I.3 : Le contrôleur de base	10
Figure I.4 : Station de base émettrice-réceptrice (BTS).....	11
Figure I.5 : Amplificateur du signal	13
Figure I.6 : Shelter	13
Figure I.7 : Le sous système réseau.....	14
Figure I.8 : Sous-système d'exploitation et de maintenance	14
Figure I.9 : Site de télécommunications.....	15
Figure I.10 : Antennes	17
Figure I.11 : Schéma fonctionnel global d'une BTS	18
Figure I.12 : Baie (rack) d'une BTS.....	18
Figure I.13 : Alimentaion dela baie	19
Figure I.14 : Liaison Abis	20
Figure I.15 : Consommation annuel de site GSM (année 2014)	21
Figure I.16 : Configuration d'un système d'alimentation d'un site de télécommunications	22
Figure I.17 : Consommation énergétique des différents composants d'un site de télécommunications	23

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un système hybride pour un site de télécommunications

Figure II.1 : Gisement solaire en Algérie	27
Figure II.2 : Différents sources utilisables dans un système électrique hybride	29
Figure II.3 : Passage d'une cellule à un champ photovoltaïque.....	30
Figure II.4 : Système de supervision.....	31
Figure II.5 : Schéma fonctionnel du site de la station de base	34
Figure II.6 : Schéma de principe PV-Groupe électrogène avec stockage	38
Figure II.7 : Simulation du système sur Matlab / Simulink	40
Figure II.8 : Caractéristiques I-V et P-V d'un module SunPower SPR-305-WHT	45
Figure II.9 : Caractéristiques I-V et P-V du champ photovoltaïque PV.....	45
Figure II.10 : Tension générée par le champ PV	47
Figure II.11 : Rapport cyclique de PV.....	48
Figure II.12 : Tension continue V_d	48
Figure II.13 : Irradiation de PV.....	48
Figure II.14 : Puissance générée par le champ PV	49
Figure II.15 : Tension de groupe électrogène	49
Figure II.16 : Courant de groupe électrogène	50
Figure II.17 : Puissance générée par le champ PV	50
Figure II.18 : Irradiation de PV.....	50
Figure II.19 : Rapport cyclique de PV.....	51
Figure II.20 : Tension générée par le champ PV	51
Figure II.21 : Graphique de la consommation journalière du site de télécommunications	52
Figure II.22 : Puissance produite par le champ photovoltaïque	53
Figure II.23 : Courbe de la puissance délivrée par les batteries	53
Figure II.24 : Courbe de puissance (Champ PV, Batteries, Charge).....	54

Chapitre III : Optimisation d'un système hybride alimentant un site de télécommunications

Figure III.1 : Modèle conceptuel du logiciel HOMER	57
Figure III.2 : Situation géographique du site de Télécommunications étudié	59
Figure III.3 : Les étapes utilisées dans logiciel HOMER	61
Figure III.4 : Courbe de rayonnement solaire pour le site étudié	62
Figure III.5 : Profil de charge du site étudié	64
Figure III.6 : Profil annuel de charge du site	64
Figure III.7 : Configuration principale du système d'alimentation d'un site de télécommunications isolé	65
Figure III.8 : Statistiques sur la production annuelle d'électricité du système de la première configuration (02 groupes électrogènes).....	68
Figure III.9 : Configuration « Réseau + GE + Système de stockage» pour l'alimentation d'un site de télécommunications isolé.....	69
Figure III.10 : Statistiques de la production annuelle d'électricité du système par le réseau électrique (sans coupures)	70
Figure III.11 : Statistiques de la production annuelle d'électricité du système par le réseau électrique et le groupe électrogène (cas de coupures fréquentes)	72
Figure III.12 : Statistiques de la production annuelle d'électricité du système par le réseau électrique et le groupe électrogène (cas de coupures très fréquentes).....	73
Figure III.13 : Configuration « PV + GE » pour l'alimentation d'un site de télécommunications isolé	74
Figure III.14 : Statistiques sur la production annuelles d'électricité du système	76
Figure III.15 : Configuration « PV + GE + Chargeur VE » pour l'alimentation d'un site de télécommunications isolé	79
Figure III.16 : Profil de charge des véhicules électriques.....	79
Figure III.17 : Statistiques sur la production et la consommation annuelles d'électricité du système.....	80

Chapitre IV : Amélioration de l'efficacité énergétique du système d'alimentation d'un site de télécommunications

Figure IV.1 : Configuration des équipements de télécommunications du système et du chargeur pour véhicule électrique	86
Figure IV.2: Véhicule électrique	87
Figure IV.3: Composantes et fonctionnement d'un véhicule électrique	88
Figure IV.4: Structure de la chaîne de traction dans un VE	89
Figure IV.5: Différents types des batteries.....	91
Figure IV.6: Configuration du système hybride	95
Figure IV.7: Panneau photovoltaïque.....	96
Figure IV.8: Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V.....	97
Figure IV.9: Influence de la température sur la courbe I-V	98
Figure IV.10: Influence de l'ensoleillement sur la courbe P-V à température constante .	99
Figure IV.11: Influence de la température sur la courbe P-V à ensoleillement constant .	99
Figure IV.12: Schéma de montage de champ de batteries	100
Figure IV.13: Groupe électrogène 6KVA.....	100
Figure IV.14: Stratégie de gestion d'énergie dans le système hybride PV/Diesel	101
Figure IV.15: Graphique de la consommation journalière du site télécom et des véhicules électriques	104
Figure IV.16: Puissance produite par le champ photovoltaïque.....	104
Figure IV.17: Courbe de la puissance des batteries avec algorithme.....	105
Figure IV.18: Courbe de la puissance délivrée par le groupe électrogène avec algorithme	106
Figure IV.19: Courbes de puissance (PV, Charge, Batteries, GE) « système sans stratégie de gestion ».....	107
Figure IV.20: Courbes de puissance GE avec et sans stratégie de gestion	108
Figure IV.21: Courbes de puissance batteries avec et sans stratégie de gestion	108

Liste des tableaux

Chapitre I : Architecture et consommation énergétique d'un site de télécommunications

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un système hybride pour un site de télécommunications

Tableau II.1 : Classification des SEH par gamme de puissance	28
Tableau II.2 : Détail de la charge du site de télécommunications pendant une journée ..	43
Tableau II.3 : Paramètres du modèle de simulation	43

Chapitre III : Optimisation d'un système hybride alimentant un site de télécommunications

Tableau III.1 : Données de rayonnement solaire pour la zone d'étude	62
Tableau III.2 : Données techniques et économiques du générateur Diesel	65
Tableau III.3 : Données techniques et économiques du combustible	66
Tableau III.4 : Données techniques et économiques des batteries	66
Tableau III.5 : Données techniques et économiques du convertisseur.....	67
Tableau III.6 : Résultats obtenus du système (02 groupes électrogènes).....	67
Tableau III.7 : Données techniques et économiques du réseau électrique.....	69
Tableau III.8 : Résultats obtenus du réseau électrique sans coupure d'électricité	70
Tableau III.9 : Résultats obtenus du réseau électrique avec des coupures fréquentes	71
Tableau III.10 : Résultats obtenus du réseau électrique avec des coupures très fréquentes.....	72
Tableau III.11 : Données techniques et économiques du générateur PV	74

Tableau III.12 : Résultats obtenus du système (PV + GE)	76
Tableau III.13 : Comparaison entre les résultats des différentes configurations	77
Tableau III.14 : Résultats obtenus du système (PV + GE + chargeur des VEs)	80
Tableau III.15 : Comparition entre le système (PV + GE) et le système (PV + GE + chargeur des VEs).....	81

Chapitre IV : Amélioration de l'efficacité énergétique du système d'alimentation d'un site de télécommunications

Tableau IV.1 : Donne une estimation du temps de recharge selon les sources d'alimentation.....	94
Tableau IV.2 : Le dimensionnement du système hybride avec le véhicule électrique ...	101
Tableau IV.3 : Détail de rechargement des véhicules électriques pendant une journée	102
Tableau IV.4 : Détail de la consommation électrique du site de télécommunications en une journée.....	103
Tableau IV.5 : Consommation globale du site de télécommunications et des véhicules électriques pendant la journée.....	103

Liste des symboles

Symbole	Désignation	Unité
P_{site}	Consommation électrique totale du site de la station de base	W
P_{cool}	Consommation électrique du système de refroidissement	
P_{rect}	Puissance consommée par l'unité d'alimentation	
P_{bk}	Consommation électrique du backhaul	
P_{bts}	Consommation électrique de la station émettrice-réceptrice de base	
P_{bb}	Consommation d'énergie de traitement du signal en bande de base	
P_{trx}	Consommation électrique de la station émettrice-réceptrice RF	
P_{pa}	Puissance consommée dans l'amplificateur de puissance	
P_t	Exprimée en fonction de la charge de trafic moyenne	
$P_{t,max}$	Puissance RF maximale transmise par secteur	
$P_{pa,max}$	Puissance de saturation maximal	
$P_{trx,ref}$	Consommation d'énergie de l'émetteur-récepteur RF	
$P_{bb,ref}$	Consommation d'énergie unitaire BB	
P_c	La puissance totale consommée par l'équipement à l'intérieur de l'armoire	
P_{bk}	La consommation électrique du backhaul (Liaison)	
η_{pa}	Rendement de l'amplificateur de puissance	%
σ_{feed}	Pertes du câble d'alimentation	W
α	Désigne la charge moyenne offerte pendant un temps d'observation approprié et a une valeur comprise entre 0 et 1. Lorsque α est égal à l'unité	
η_{pa}	La valeur de l'efficacité de l'amplificateur de puissance	
$\eta_{pa,max}$	L'efficacité maximale de l'amplificateur de puissance	
BTU	British Thermal Unit	Heure
I_{re}	Courant fourni par les panneaux	A
I_{bat}	Courant délivré par la batterie	
I_{ge}	Courant fourni par le groupe électrogène	
eff_{bc}	Rendement du redresseur	%
eff_{ond}	Rendement de l'onduleur	
X_{RD}	La part de courant de charge du groupe électrogène exprimé en pourcentage	
X_S	Position de l'onduleur (fermé ou ouvert)	
H_β	L'irradiation incidente sur les modules PV avec un angle β	W/m ²
S_{ref}	La surface de référence	m ²
η_{PV}	Rendement du champ PV	%
P_C	Puissance instantanée demandée	W
Pc	Puissance crête du champ photovoltaïque	

E_{bes}	Besoin journalier	Wh/j
E_{stc}	Ensoleillement dans les conditions STC ($E_{stc} = 1000$)	W/m ²
E_{mes}	Ensoleillement du site d'installation	kWh/j.m ²
C_p	Le ratio de performance du système	
$P_{pv\ unitaire}$	Puissance d'un module photovoltaïque	W
C_B	Capacité total des batteries	Ah
B_j	Besoin journalier	Wh/j
J_{Auto}	Nombre de jour d'autonomie	
V_B	Tension de la batterie	V
K_B	Coefficient de température de la batterie (0.85)	
I_{cc}	Courant de court-circuit	A
I_{mp}	Courant du la puissance maximale	
V_{co}	Tension en circuit ouvert	V
V_{mp}	Tension du la puissance maximale	
$C_{annuel\ tot}$	Coût annuel absolu	\$
t	Taux d'intérêt	
FRC	Facteur de récupération du capital	
D_{projet}	Durée de vie du projet	Année
$E_{principale\ CA}$	Charge CA principale desservie	C
$E_{principale\ CC}$	Charge CC principale desservie	
$E_{ventes\ de\ grille}$	Ventes de grille absolues	
P_{diesel}	Puissance fournie par le générateur diesel	W
$P_{renouvelable}$	Production de sources renouvelables	
$P_{PV-sortie}$	Puissance de sortie de la cellule PV	
$P_{pv-nominale}$	Puissance nominale PV	
E	L'éclairement solaire	W/m ²
E_{ref}	L'éclairement solaire au standard état de température ($E_{ref} = 1000\ W/m^2$)	
T_{ref}	Température de la cellule comme conditions de référence ($T_{ref} = 25^\circ C$)	°C
T_c	Température de la cellule	
T_{amb}	Température ambiante	
K_T	Coefficient de température du module PV	

Liste des abréviations

Abséviations	Désignation
BTS	Base transceiver station
BSC	Base station controller

BSS	Base station subsystem
MSC	Mobile switching center
GMSC	Gateway MSC
MS	Mobile station
HLR	Home location register
VLR	Visited location register
ELR	Equipment identity register
AUC	Authentication center
NSS	Network Switching SubSystem
OSS	Operating Subsystem
OMC	operating and maintenance center
NMC	Network Management Center
SEH	Systèmes d'énergie hybride
PV	Photovoltaïque
MPPT	Maximum Power Point Tracking
CC	Courant Continu
CA	Courant Alternatif
SER	Sources d'énergie renouvelables
GD	Générateur Diesel
GE	Groupe électrogène
GPV	Générateur photovoltaïque
STC	Standard Test Conditions (Air Masse=1.5 ;T=25°C ;G=1000W/m ²)
NREL	National Renewable Energy Laboratory
HOMER	Hybrid Optimization Model for Electric Renewables
RAN	Réseau d'accès radio
AP	Amplificateur de puissance
RF	Radio-fréquence
Backhaul	le réseau de liaison englobant les liaisons intermédiaires qui relient les sites de stations de base au réseau central
n_s	Fait référence au nombre de secteurs par site
n_t	Le nombre d'antennes d'émission par secteur
BB	L'unité de traitement en bande de base
EER	Le ratio d'efficacité énergétique
SDM	L'état de décharge de la batterie à partir duquel le groupe démarre
SAR	L'état de charge de la batterie à partir duquel le groupe s'arrête
B	Bande passante du système
B_{ref}	Bande passante de référence
N_{pv}	Nombre de panneau
PMD	Profondeur maximale de décharge (80%)

<i>CAN</i>	Coût actuel net total
<i>CNE</i>	Coût nivelé de l'énergie
<i>FR</i>	Fraction renouvelable
<i>VE</i>	Véhicule électrique
<i>D</i>	Rapport cyclique de PV

Introduction générale

Introduction générale

Contexte

L'expansion mondiale des stations de base de téléphonie mobile a lieu, de plus en plus, dans des régions dans lesquelles le réseau électrique subit souvent des coupures relativement longues ou bien dans lesquelles aucun accès au réseau électrique n'est disponible. Pour assurer l'alimentation en électricité d'une ou plusieurs BTS « **Base transceiver station**, et en français : **station de transmission de base** » également dans de telles régions, des générateurs diesel sont généralement utilisés.

Face à cette demande croissante, le développement de sources d'énergies plus propres est fortement préconisé. Dans le cas de l'énergie électrique, les solutions alternatives peuvent être les sources photovoltaïques, éoliennes, ou encore hydroélectriques. En outre, les sites difficiles d'accès ou très isolés ne peuvent pas toujours être raccordés au réseau, faute de solutions techniques ou de viabilité économique. Or, pouvant être dimensionnées pour des usages industriels ou domestiques, les sources d'énergies renouvelables se prêtent particulièrement bien à la production d'électricité dite en site isolé, ou en micro réseau. Elles sont alors souvent associées à des batteries, qui permettent d'assurer le stockage de l'énergie en cas de production excédentaire, ou de compenser le manque momentané de puissance lors des pics de consommation.

L'Algérie, dont l'électricité est principalement basée sur des ressources conventionnelles, située entre 36°42' N (latitude) et 03°13' E (longitude), contient de nombreuses stations de télécommunications localisées dans des zones isolées ou très éloignées des réseaux électriques, où les raccorder à l'électricité est souvent trop cher et parfois impossible. C'est pourquoi, les systèmes autonomes sont intéressants pour répondre aux besoins énergétiques dans ces régions. L'utilisation de groupes électrogènes diesel est souvent considérée comme une solution économique et fiable, mais générant certaines nuisances environnementales pour les utilisateurs. Ces derniers requièrent une maintenance importante et consomment relativement beaucoup de carburant diesel pour une faible utilisation. Ils génèrent donc des dépenses importantes d'exploitation et les exploitants de réseaux de téléphonie mobile sont confrontés au défi de limiter le coût total de possession.

En Algérie, l'énergie photovoltaïque apparaît comme la solution la plus attractive pour répondre aux besoins en énergie d'un poste de télécommunications isolé, comme c'est le cas de beaucoup de sites de télécommunications dans les différentes régions de notre pays.

Ce choix se justifie par le fait que l'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population. Le caractère écologique du photovoltaïque peut aussi être mis en avant par rapport à d'autres moyens de production : contrairement à ce que l'on peut croire, une telle installation rembourse l'énergie nécessaire à sa fabrication dans un délai de 1 à 3 ans suivant l'ensoleillement du site selon l'Agence Internationale de l'Énergie, et de surcroît, permet d'économiser entre 1,4 et 3 tonnes de CO₂ au cours de sa durée de vie pour 1 kW_c installé.

Cependant, la limitation de la charge électrique à satisfaire (due au caractère intermittent des sources solaires) c'est le problème rédhibitoire. De plus, les performances des systèmes PV dépendent fortement de l'emplacement géographique et du type de modules PV utilisés, et de tels systèmes sont utiles dans les zones ayant une bonne quantité de rayonnement solaire incident. Pour cela, un système hybride peut être une solution aux problèmes rencontrés dans les systèmes diesel ou PV seuls en ajoutant les avantages et en éliminant les inconvénients.

Problématique

La combinaison des sources d'énergies renouvelables avec les sources d'énergie conventionnelle est une solution qui a plusieurs impacts bénéfiques sur l'environnement ainsi que la qualité de vie de ceux qui profitent de ce genre des réseaux électriques. L'objectif d'un tel système est d'assurer l'autonomie énergétique complète d'une ou plusieurs stations qu'il dessert, tout en restant économiquement et écologiquement viable. Néanmoins, la production variable et incertaine de l'énergie renouvelable rend cette solution difficile à implémenter et freine son développement. En effet, trois types de problèmes apparaissent alors.

Premièrement, les sources ont un coût important, et consomment beaucoup d'énergie à leur fabrication, générant ainsi une dette écologique à compenser pendant

leur durée de vie. Il y a donc tout intérêt à maximiser leur production pour les rentabiliser au mieux, et par là même garantir l'autonomie énergétique.

Deuxièmement, la batterie s'avère être le composant le plus critique du système : possédant une durée de vie en nombre de cycles de charge-décharge très limitée, et étant dans ce type d'application à changer périodiquement, elle entraîne des coûts économiques et écologiques importants.

Enfin, le principal défaut des énergies renouvelables est qu'elles dépendent entièrement des conditions climatiques, qui sont souvent irrégulières, et très peu prévisibles.

Notre étude propose une optimisation de l'architecture et un dimensionnement des systèmes de puissance hybrides (ou multi-sources), pour les sites de télécommunications isolés. Aussi, nous proposons une stratégie de gestion d'énergie d'un système de ce type, en développant des commandes pour régir les convertisseurs des différents modules, selon les objectifs de maximisation de la puissance produite, et de répartition efficace de celle-ci entre des modules de stockage adaptés.

Pour cela, une gestion de puissance assez complexe entre les différentes sources du réseau isolé doit être présente. La gestion de puissance est assurée par des algorithmes de contrôle qui supervise l'écoulement de puissance. Le but est d'assurer la continuité d'alimentation électrique tout en assurant la réduction de l'utilisation des générateurs diesel, l'extraction de la puissance maximale, la synchronisation correcte des sources d'énergie et finalement le partage convenable de la puissance entre les sources de production disponibles. Ces problèmes doivent être traités convenablement afin de répondre à cette problématique.

Objectifs du travail

Actuellement les sites de télécommunications isolés des différents opérateurs de téléphonie mobile en Algérie sont alimentés par des groupes électrogènes. L'objectif principal de ce travail de recherche est d'assurer un approvisionnement stable et continu pour de tels sites en développant un système de gestion et de contrôle optimal de l'énergie. Afin d'atteindre notre objectif ultime, plusieurs objectifs tirés de la problématique énoncés précédemment ont été définis :

- Briser la barrière qui ne favorise pas une émergence des énergies renouvelables dans les systèmes de production, surtout pour le cas des sites isolés qui sont implantés dans des zones non couvertes par le réseau national d'électricité (SONELGAZ).
- Présenter une méthode de dimensionnement d'un système photovoltaïque comme source de production principale avec en toile les données climatiques et géographiques de la région du site. La deuxième source qui est un groupe électrogène diesel viendra en appoint pour les périodes de faible ensoleillement ou pendant les nuits de fortes consommations.
- Faire ressortir les difficultés et contraintes liées à l'utilisation des groupes électrogènes comme seule source d'alimentation des sites de production.
- Faire une étude comparative pour montrer la viabilité économique du système photovoltaïque et groupe électrogène par rapport au système existant.
- Gestion de l'écoulement de puissance entre les différents éléments du système qui vise à réduire l'utilisation du générateur diesel tout en protégeant la batterie contre la surcharge et la sous-charge
- Extraction de la puissance maximale des sources d'énergie renouvelables
- Doter les sites de télécommunications en milieu saharien de chargeur de véhicules électriques afin de baisser les coûts, accroître l'efficacité énergétique et promouvoir le tourisme dans ces régions.

Organisation de la thèse

Cette problématique sera traitée dans cette thèse à travers quatre chapitres.

Le premier présentera un état de l'art des architectures des réseaux de télécommunications. Cela permettra de détailler le rôle des différents éléments constituant un site de télécommunications, leurs consommations énergétiques, et leurs systèmes d'alimentations adéquats à mettre en œuvre et les stratégies usuellement suivies.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation du système. Les modèles des sources, mais aussi des unités de stockage, seront détaillés. Par suite, après avoir présenté la modélisation de consommation électrique des stations de télécommunications, et caractérisé les sources et les composants de stockage, nous

développerons une modélisation énergétique du système global. Enfin, des simulations réalisées sous Simulink seront présentées et analysées pour chaque module, ainsi que pour le système complet.

Le chapitre trois présentera la rentabilité technique, économique et environnementale des systèmes hybrides par rapport à aux solutions classiques déjà utilisées pour alimenter les sites des télécommunications isolés en Algérie. Une analyse comparative sera aussi présentée entre les résultats obtenus avec plusieurs configurations possibles, afin de déterminer la solution la plus rentable de points de vue technique, économique et environnemental. Dans ce chapitre, le logiciel Homer sera utilisé pour l'optimisation des systèmes proposés et l'analyse économique.

Le quatrième chapitre présente la topologie d'un générateur PV/diesel avec un système de stockage et un chargeur de véhicules électriques. Un superviseur de gestion de l'écoulement de la puissance est réalisé. Le superviseur a pour objectif principal d'améliorer l'efficacité énergétique notre système. Cela semble indispensable pour une meilleure adaptation source/charge, permettant ainsi une gestion rationnelle de l'énergie en cas de brusques changements de température et ensoleillement.

Enfin, une conclusion regroupant les différents résultats obtenus et les perspectives qui en découlent de ce travail de recherche.

Chapitre I

**Architecture et consommation
énergétique d'un site de
télécommunications**

I.1 Introduction

Actuellement, le secteur de la télécommunications est indispensable pour les individus. Elle signifie communication à distance dont la fonction principale est l'échange d'informations entre deux abonnés quelle que soit la distance.

La communication via les téléphones mobiles se fait par émission/réception d'ondes électromagnétiques du domaine des hautes fréquences. Le téléphone portable transforme le son d'une conversation en ondes électromagnétiques émises par l'antenne du téléphone jusqu'à la station de base (ou antenne-relais) qui couvre cette partie du territoire (ou cellule) puis le signal est relayé par l'ensemble du réseau.

Le système GSM (Global System for Mobile communication) utilise 2 fréquences :

- Le GSM 900 dont la fréquence porteuse est de 872 à 960 MHz.
- Le GSM 1800 dont la fréquence va de 1710 à 1875 MHz.

Le système UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) pour les télécommunications de 3ème génération (3G) emprunte des fréquences de 1885 à 2025 MHz et 2110 à 2220 MHz.

Le système LTE (Long Term Evolution) ou 4G utilise en théorie les fréquences 800 et 2600 MHz, mais réutilise en pratique des bandes déjà existantes (900 MHz) et de nouvelles (700 MHz).

La 5G, prévue et utilisable pour le monde des objets communicants ou internet des objets (IoT en anglais) utilisera principalement dans les premières années la fréquence de 3,5 GHz (Corée, Australie, France, Suisse, ...) ainsi que des fréquences déjà existantes (Suisse : 700 MHz), puis pourra progressivement utiliser des fréquences plus élevées (26-28 GHz, 40 GHz, 60 GHz).

Un téléphone portable émet et reçoit des ondes électromagnétiques du domaine des radiofréquences. Avec la 2G, lors d'une conversation, le mobile émet une série d'impulsions de durée brève (0,577 msec) pour délivrer l'information. Ces impulsions sont répétées à intervalles réguliers de 4,6 msec, soit à raison de 217 impulsions par seconde. Avec les générations suivantes, le codage de l'information pour séparer les utilisateurs est plus complexe, et il n'y a plus d'impulsions temporelles. Dans le domaine de télécommunications, on distingue 2 types d'antennes relais. Les antennes micro-cellulaires et les antennes macro-cellulaires. Les antennes macro-cellulaires sont les plus

utilisées. Elles ont une puissance de 20 à 30 watts et peuvent couvrir une large étendue (jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres). Les antennes micro-cellulaires, ont une moindre puissance et couvrent une distance plus petite. Elles sont utilisées dans des zones denses d'utilisateurs, en ville par exemple.

Les opérateurs mobiles doivent mettre en place un très grand nombre de sites d'émission et de réception pour couvrir la zone afin que leurs abonnés puissent passer des appels. Ces émetteurs-récepteurs, également appelés relais, BTS ou stations de base, servent d'intermédiaires entre le téléphone mobile et le sous-système réseau (NSS) qui regroupe tous les éléments de gestion du téléphone mobile et de routage des communications. Le BTS (station de transmission de base) est un élément important pour la transmission des données. Elle joue un rôle primordial pour évaluer la qualité d'un réseau. Elle est, également, l'élément central que l'on pourrait définir comme un ensemble d'émetteurs-récepteurs et d'antennes pilotant une ou plusieurs cellules, assurant l'interface entre les terminaux mobiles et le centre de communications. [1]

I.2 Architecture du réseau de télécommunications

L'architecture d'un réseau GSM peut être divisée en quatre sous ensembles :

- La Station Mobile (Mobile Station, MS).
- Le Sous-système Radio (Base Station Subsystem, BSS).
- Le Sous-système Réseau (Network Subsystem, NSS).
- Le Sous-système d'exploitation et de maintenance (Operating Subsystem, OSS).

Les principaux sous-systèmes du réseau et les éléments dont ils se composent sont exposés dans la figure I.1 :

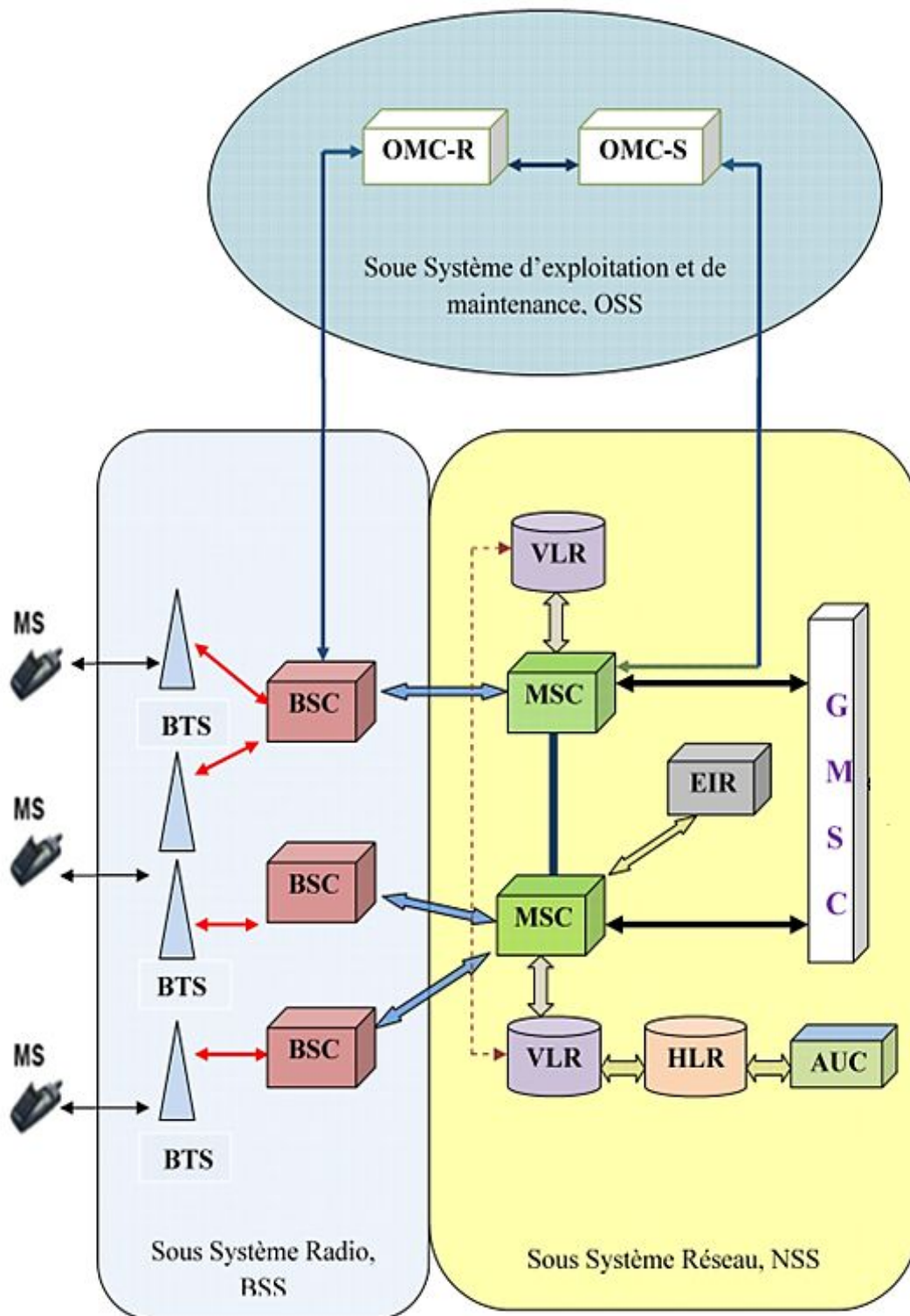


Figure I.1 : Architecture d'un réseaux de télécommunications

BTS : Base transceiver station ; BSC : Base station controller ; BSS : Base station subsystem (BTS+BSC) ; MSC : Mobile switching center ; GMSC : Gateway MSC ; MS : Mobile station ; HLR : Home location register ; VLR : Visited location register ; ELR : Equipment identy register ; AUC : Authentication center.

I.3 Station mobile

La station mobile se compose d'un terminal et d'une carte SIM (Subscriber Identity Module). Le terminal mobile est un appareil constitué d'un émetteur/récepteur, il peut être un simple téléphone mobile, une tablette, ou un ordinateur de poche très évolué. Chaque terminal est différencié des autres par un code IMEI (international mobile equipment identity) qui est un numéro de 15 chiffres.

Une carte SIM est une carte à puce doté d'une mémoire et d'un microprocesseur, elle se comporte comme une mini base de données. Elle contient des données spécifiques comme le code PIN (Personal Identification Number) et d'autres caractéristiques de l'abonné, de l'environnement radio et de l'environnement de l'utilisateur. La carte SIM contient un code appelé IMSI (international mobile subscriber identity), qui sert à identifier un abonné dans n'importe quel réseau GSM. Une carte SIM est indépendante du terminal, elle peut fonctionner dans n'importe quel terminal GSM. Un téléphone mobile de sa part ne fonctionne qu'une fois la carte SIM insérée, à l'exception des appels d'urgences.

I.4 Sous-système radio : BSS (Base Station Subsystem)

Le réseau de télécommunications est basé sur des transmissions par voie hertzienne, l'échange des données est géré par le sous-système radio. Ce dernier est constitué de deux éléments, soit la station de base (BTS) et le contrôleur de station de base (BSC).

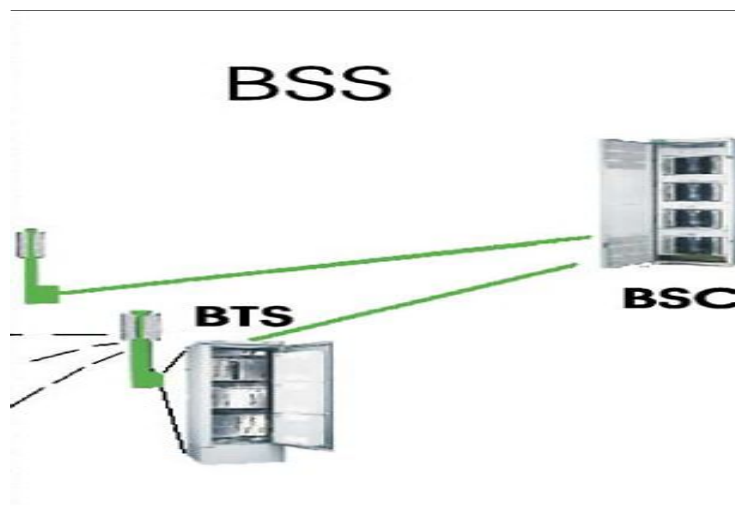


Figure I.2 :Le sous-système radio (BSS)

I.4.1 Contrôleur de base : BSC (Base Station Controller)

Le BSC est l'élément intelligent du sous-système radio, son rôle est de gérer les ressources radio (configuration des canaux, transfert intercellulaire ou handover) d'une ou plusieurs BTS, en plus d'établir le lien physique entre les BTS et le commutateur de service mobile MSC se trouvant dans le sous-système réseau. Le BSC détermine la puissance optimale avec laquelle le MS(Mobile Station) et la BTS effectuent la transmission sur le canal radio et vérifie la qualité du service en se basant sur les mesures effectuées par la BTS.



Figure I.3 : Le contrôleur de base

I.4.2 BTS

La BTS (Base Transceiver Station – Station de base émettrice-réceptrice) est un ensemble d'émetteurs-récepteurs et le premier élément électronique « vu » par le téléphone, elle se trouve près des antennes, dans une baie métallique. La BTS est constitué de nombreuses cartes électroniques qui organisent la liaison entre le téléphone et le réseau GSM. Elle gère les problèmes liés à la transmission radio (modulation, démodulation, égalisation, codage correcteur d'erreur...). Le placement et le type des BTS déterminent la forme des cellules. Elle réalise aussi des mesures radio pour vérifier qu'une communication en cours se déroule correctement (évaluation de la distance et de la puissance du signal émis par le terminal de l'abonné): Ces mesures sont directement transmises à la BSC (Base Station Controller).



Figure I.4 : Station de base émettrice-réceptrice (BTS)

I.4.3 Différents types des stations de base (BTS)

Il existe différents types de BTS proposées pour répondre aux différents besoins étudiés ci-dessus. Ces stations sont conçues par différents constructeurs qui respectent strictement la norme GSM de manière à ce que le matériel de différents constructeurs puisse être compatible. Les BTS sont de puissance variable de manière à éviter les interférences entre deux cellules: comme nous le verrons, il est important de réguler la puissance du portable de manière à éviter ces mêmes interférences. Ces différents types sont :

I.4.3.1 BTS rayonnantes

Elles sont utilisées pour couvrir les sites où la densité d'abonnés est faible. Elles sont situées sur des points stratégiques (sommets, pylônes...). Ces stations émettent dans toutes les directions, et ce sont les stations les plus visibles. Elles couvrent des macros cellules. On en trouve en abondance au bord des autoroutes. Ces BTS ne peuvent pas être utilisées dans les zones de forte densité car elles émettent et occupent la bande passante du réseau sur une grande distance (jusqu'à 20 Km).

I.4.3.2 BTS ciblées

Elles sont le plus souvent placées dans des zones à plus forte densité d'abonnés que les BTS rayonnantes. On les retrouve en ville par exemple. Elles sont de forme relativement allongée et permettent d'émettre suivant un angle très précis. On peut grâce à cela réutiliser facilement le même canal dans une autre cellule à proximité.

On trouve aussi les micros BTS qui ont les mêmes caractéristiques que les BTS ciblées. En effet, une bonne étude d'implantation permet avec ce type de BTS de créer une couverture à deux niveaux: sur un premier niveau, les micro-BTS couvrent les 3 premiers mètres grâce à des émetteurs très ciblés. Un second niveau (étage plus élevé des immeubles) sera couvert par des BTS ciblées. [2]

I.4.3.3 Amplificateurs de signal

Ces stations de bases ne sont pas reliées avec les BSC. elles sont utilisées dans les zones à reliefs difficiles pour couvrir les trous laissés par une BTS principale. Ils permettent donc d'amplifier un signal de faible puissance et de l'émettre vers les zones laissées par la BTS mère.

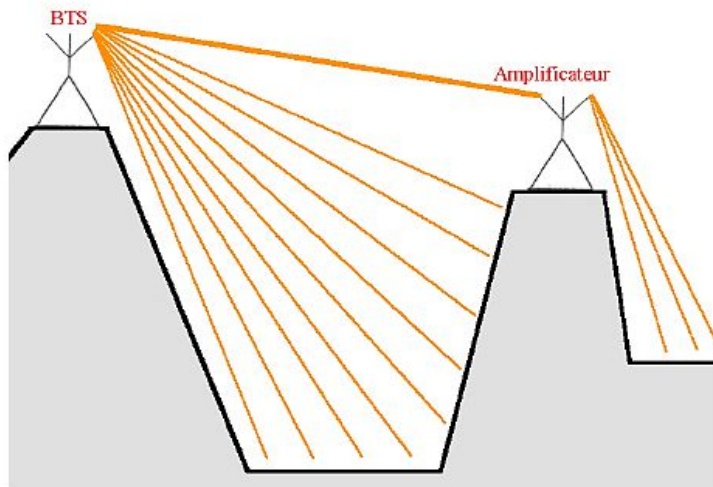


Figure I.5 : Amplificateur du signal

I.4.4 Shelter

Les shelters (Shelter – abri, local technique) sont utilisés pour abriter le matériel d’émission GSM, de radiodiffusion, ou de télédiffusion. Ils sont souvent en bâtiments préfabriqués de petite taille, et se trouvent au pied des pylônes.



Figure I.6 : Shelter

I.5 Sous système réseau : NSS (Network Switching SubSystem)

Le NSS joue un rôle essentiel dans un réseau mobile. Alors que le sous-système radiogère l'accès radio, les éléments du NSS prennent en charge toutes les fonctions de contrôle et d'analyse d'informations contenues dans les bases de données nécessaires à l'établissement des connexions.

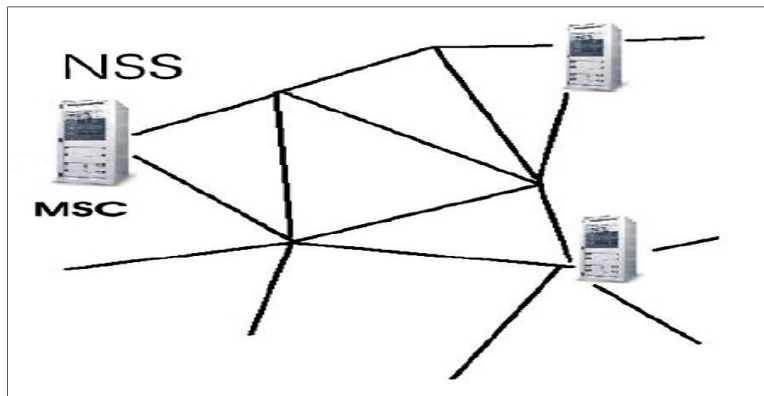


Figure I.7 : Le sous système réseau

I.6 Sous-système d'exploitation et de maintenance : OSS(Operating Subsystem)

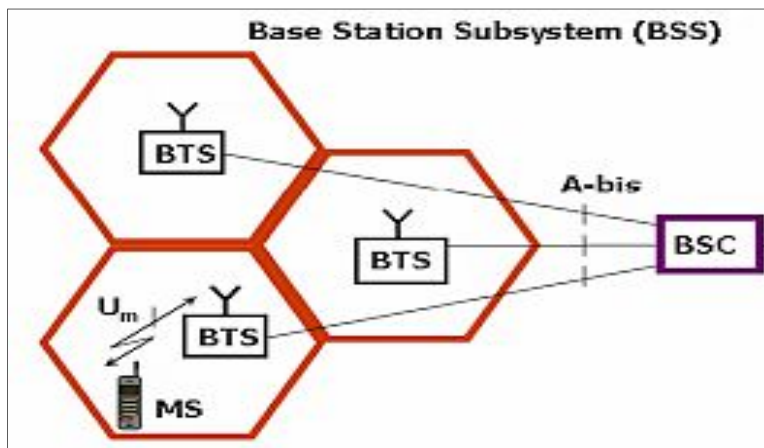


Figure I.8 : Sous-système d'exploitation et de maintenance

Cette partie du réseau s'occupe de la gestion et de l'exploitation des éléments des deux sous-réseaux précédents comme les BTS, les BSC, les MSC...etc. les concepteurs du GSM ont adopté une structure hiérarchique, elle présente deux niveaux :

I.6.1 OMC (operating and maintenance center)

Le centre d'exploitation et de maintenance permet une supervision locale des équipements, plusieurs OMC supervisent les BTS et les BSC de plusieurs cellules, il

regroupe trois activités principales de gestion : La gestion administrative et la gestion commerciale qui s'intéressent aux abonnés en termes de création, modification des comptes et de la facturation des appels. La gestion technique des équipements permet de garantir le bon fonctionnement du matériels, il gère notamment les alarmes, les pannes, la sécurité, la mise à jour des logiciels...etc.

Dans les OMC, on distingue l'OMC/R (Radio) qui est relié à travers les BSC au sous-système radio. L'OMC/S (Système) qui est relié à travers les MSC au sous-système réseau. Il y a aussi l'OMC/M (Maintenance) qui contrôle les OMC/R et OMC/S.

I.6.2 NMC (Network Management Center)

Le NMC permet l'administration générale de l'ensemble du réseau par un contrôle centralisé. Ainsi, les incidents majeurs transmis à l'OMC remontent jusqu'au NMC qui les traite.

I.7 Composition et rôle des éléments d'un site de télécommunications

Les principaux éléments d'un site de télécommunications sont montrés dans la figure I.9.

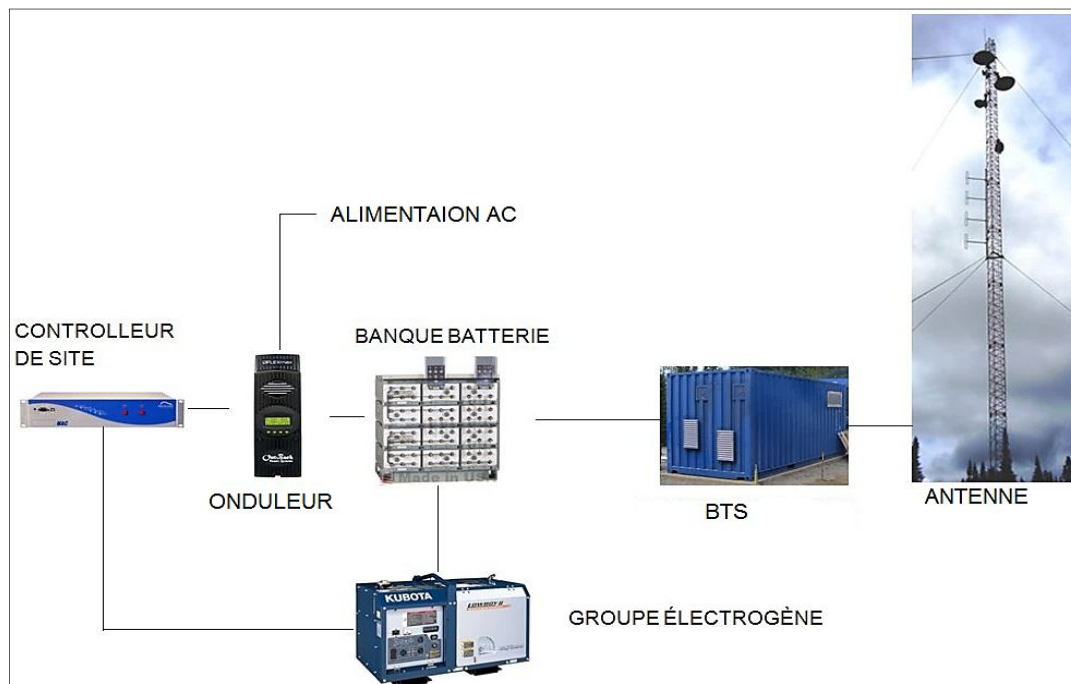


Figure I.9 : Site de télécommunications

I.7.1 Groupe électrogène

Le rôle du groupe électrogène est d'assurer l'alimentation du site de télécommunications en cas de besoin. Généralement, il agit comme une source d'énergie constante. Dans un site de télécommunications, il est conçu pour alimenter le site et également pour charger le système de stockage d'énergie. Un bon bilan énergétique est nécessaire pour assurer un fonctionnement optimal car la consommation du carburant est proportionnelle à la puissance étant fournie par le groupe électrogène. Les générateurs diesel peuvent augmenter l'approvisionnement en électricité lors d'une augmentation soudaine de demande d'énergie ou lorsque la capacité des batteries, diminue et donc pour éviter une interruption d'approvisionnement. Le générateur est caractérisé par son rendement défini comme le rapport de la puissance électrique fournie à l'énergie équivalente du combustible utilisé pour la produire. La consommation de carburant d'un groupe électrogène peut être caractérisée par des quantités correspondant aux différents points de fonctionnement du moteur.

I.7.2 Batterie

un parc de batteries est un système de stockage d'énergie électrique pour un site de télécommunication. Les techniques de stockage d'énergie sont une partie très importante d'un système de production d'électricité. Le stockage assure une certaine stabilité de sortie en matière de tension et de fréquence tout en étant une énergie fiable, et les éléments de base qui favorisent le stockage d'énergie sont d'augmenter l'autoproduction et l'autoconsommation d'énergie et d'augmenter la stabilité, la fiabilité et la flexibilité du système électrique.

I.7.3 Onduleur

Tout système d'alimentation fonctionnant à la fois avec un courant continu et un courant alternatif nécessite un convertisseur pour l'équipement comme l'onduleur, il permet de convertir la tension 48 V à traverser le banc de batterie pour alimenter le système de climatisation et l'éclairage avec une tension de 220 au niveau du site télécommunications.

I.7.4 Contrôleur de site

L'objectif principal du contrôleur est d'empêcher les batteries de se surcharger. Le contrôleur lit directement le niveau de la batterie pour qui lui évite de charger les batteries au-delà de 100% et le même en cas du décharge les batteries pas moins a 20%.

I.7.5 Antennes

Les antennes sont les composantes les plus visibles du site. On les voit un peu partout, souvent sur des hauts pylônes, sur des toits d'immeubles, contre des murs, à l'intérieur des bâtiments ; il arrive assez souvent qu'elles soient invisibles puisque camouflées, pour des raisons esthétiques, à proximité de bâtiment classés « monuments historiques ». Ces antennes permettent de réaliser la liaison entre la MS (téléphone mobile) et la BTS. [3]



Figure I.10 : Antennes

I.7.6 BTS (Base Transceiver Station)

La BTS est le premier élément électronique actif du réseau de télécommunications, vu par le mobile. C'est l'élément intermédiaire entre le BSC qui reçoit des informations, donne des ordres et le mobile qui les exécute. [4]

La figure I.11 représente un schéma synoptique très simplifié, afin de présenter de manière très claire les éléments essentiels d'une BTS.

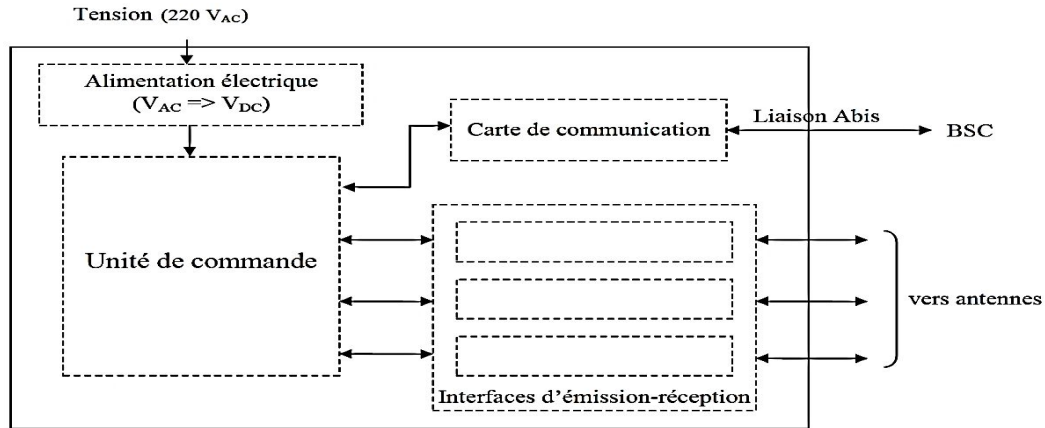


Figure I.11 : Schéma fonctionnel global d'une BTS

Une BTS est composée d'une ou de plusieurs baie (grande armoire métallique) modulaire avec des emplacements disponibles pour enficher des cartes électroniques. [5]

1.7.6.1 Baie (Rack)

La baie est une grande armoire métallique, parfaitement blindée électriquement, hermétique, climatisée l'été et chauffée en hiver pour conserver une température de fonctionnement constante. Elle contient des emplacements pour des cartes électroniques qui sont ajoutées suivant les besoins du site.

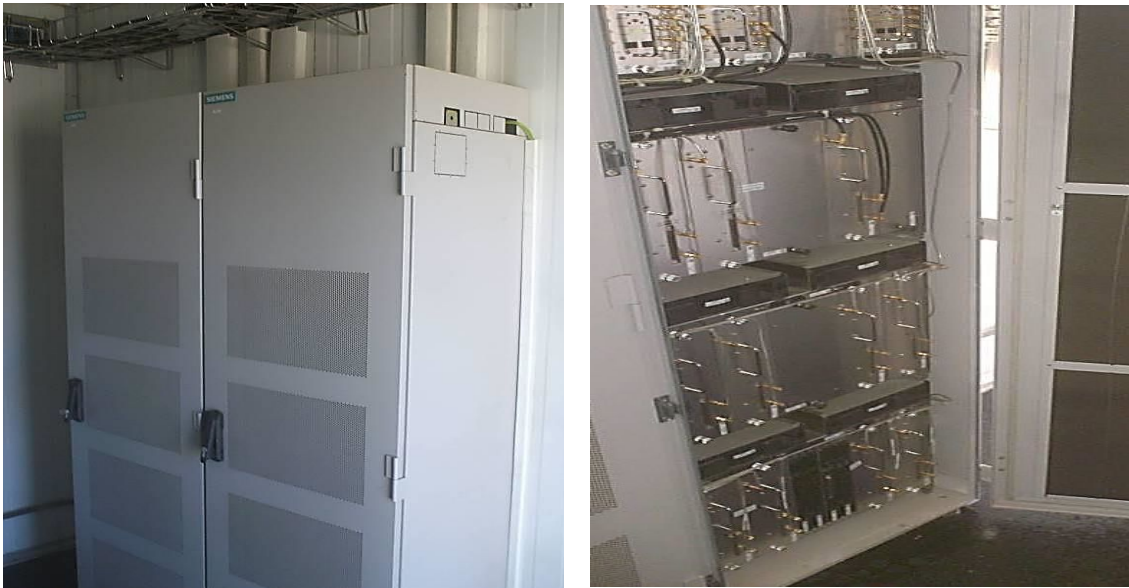


Figure I.12: Baie (rack) d'une BTS

1.7.6.2 Alimentation

L'alimentation de la baie se fait avec la tension du réseau 220V alternatif. Ensuite, le redresseur convertit cette tension en une tension continue pour l'alimentation de tous les éléments de la BTS, qui peut consommer jusqu'à une trentaine d'ampères en fonctionnement à plein régime. Des batteries sont associées à cette alimentation, pour permettre un fonctionnement de plusieurs heures en cas de coupure de courant.



Figure I.13 : Alimentation de la baie

1.7.6.3 Unité de commande

L'unité de commande est la partie essentielle de la BTS, elle gère tout son fonctionnement. Elle génère les fréquences de référence, crée les différentes porteuses, assure la modulation et démodulation des signaux, commande les amplificateurs de puissance, fournit les signaux aux TRX, et ceci sur tous les secteurs.

1.7.6.4 Carte de communication

La carte de communication est l'intermédiaire entre l'unité de commande de la BTS et le BSC. Cette carte gère la liaison Abis entre la BTS et le BSC.

I.7.6.5 Interface d'émission-réception

Chaque secteur a sa propre interface d'émission-réception, cette interface gère le signal radio, elle est composée de TRX (ou DRX et PA) et d'éléments de couplage, qui permettent d'associer ou de dissocier des signaux en provenance ou à destination des antennes.

I.7.7 Liaison Abis

La liaison Abis est le nom donné à la liaison entre la BTS (Base Transceiver Station) et le BSC (Base Station Controller) qui commande tout le fonctionnement de la BTS. Cette liaison assure le transport des informations vers le BSC : commande de la BTS, signalisation, mais surtout des communications (vocales et data) des abonnés mobiles. La BTS étant un élément déporté du réseau, elle émet et reçoit des informations d'un côté avec la MS (Mobile Station : téléphone), elle les traite puis envoie d'autres informations au BSC qui, lui, donne des ordres à exécuter. La liaison Abis est donc une liaison importante qui demande des débits conséquents.

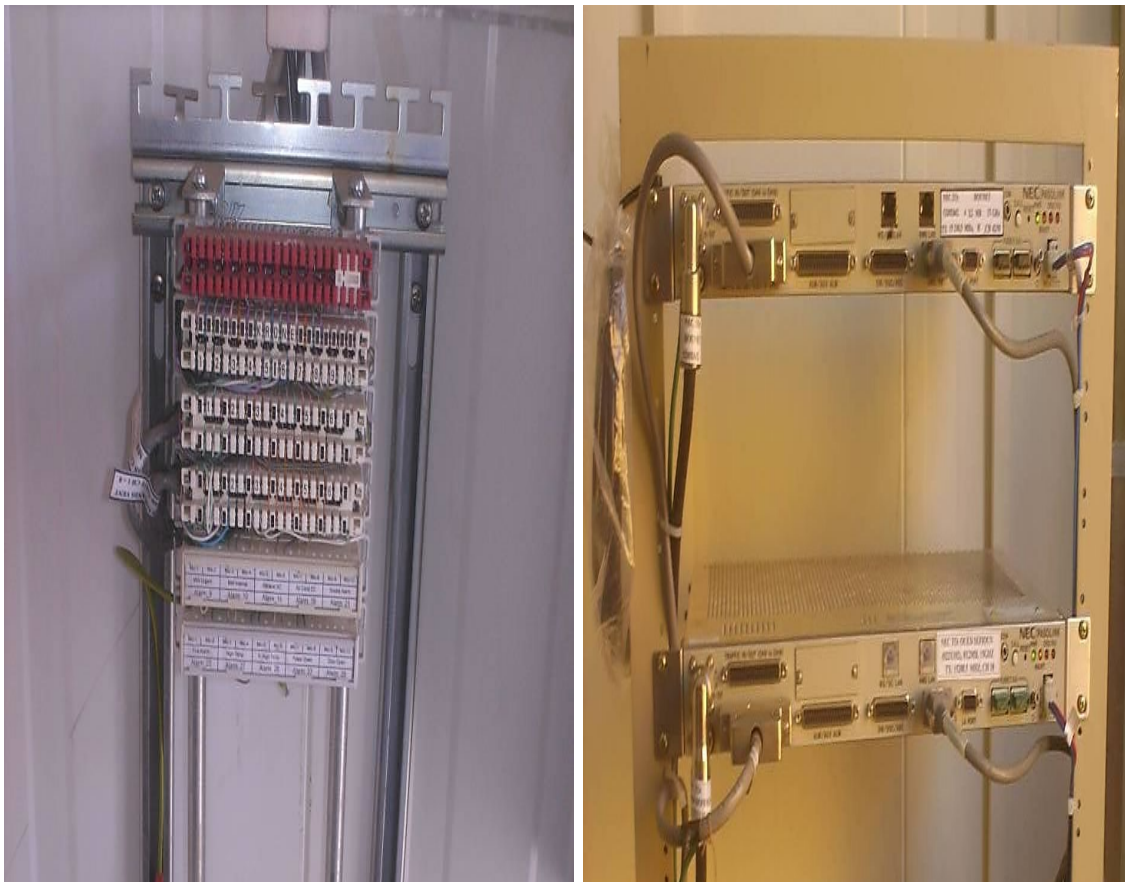


Figure I.14: Liaison Abis

I.8 Consommation énergétique d'un site de télécommunications

La hausse inattendue du nombre d'abonnés et la demande de données à haute vitesse a entraîné une énorme croissance dans les réseaux de téléphonie mobile durant les dernières années. En effet les réseaux de téléphonie mobile (relais GSM, radar...etc.) ont évolué afin de répondre aux besoins des abonnés mobiles et à l'extension de la zone de couverture [6]. Pour assurer leur fonction, les sites de télécommunications nécessitent une alimentation en énergie électrique stable et fiable. Celle-ci provient souvent de réseau électrique avec une source de secours.

L'alimentation du site se fait avec la tension du réseau de distribution 220/380V alternative. Ensuite, cette tension convertit en une tension continue pour l'alimentation des équipements de télécommunication, qui peuvent consommer jusqu'à une trentaine d'ampères en fonctionnement à plein régime. La consommation du site varie en fonction de régime d'exploitations, de site d'installation, de type de relais (Pylône) et ses besoins en climatisation.

L'estimation de la consommation totale d'un site de télécommunications peut se faire, soit par les mesures (comptage) pour les sites en service, soit en bilan de puissance des appareils. Cette consommation peut atteindre quelques kW (de 5 à 10KW).

Des batteries sont associées à cette alimentation, pour permettre un fonctionnement de plusieurs heures en cas de coupure de courant. Si la panne de courant survient pendant la journée, le groupe électrogène intervient pour prendre le relais.

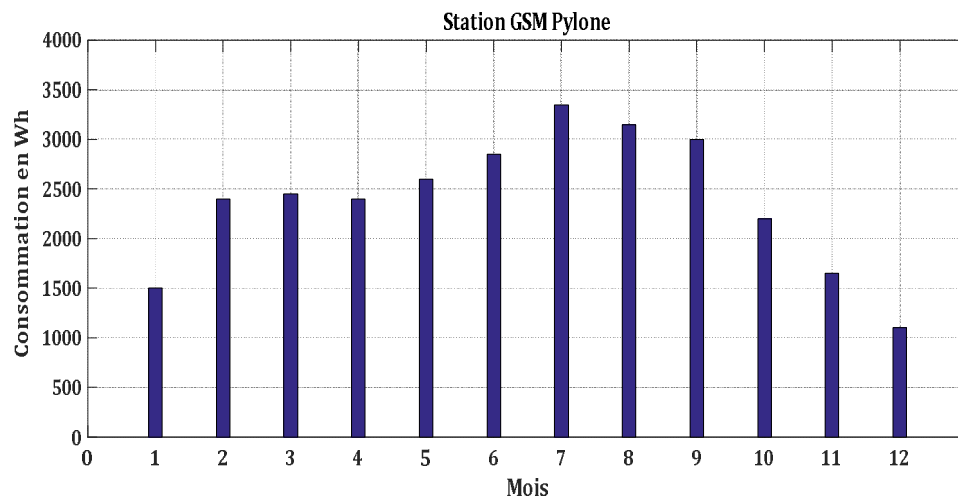


Figure I.15 : Consommation annuel de site GSM (année 2014) [6]

On remarque que la consommation d'énergie augmente de janvier à juillet et diminue jusqu'à la fin de l'année en raison de la consommation des clients. La température élevée est un facteur dans l'augmentation de la consommation d'électricité des climatiseurs électriques afin que les appareils fonctionnent dans des conditions appropriées.

I.8.1 Architecture du système d'alimentation d'un site de télécommunications

La figure I.16 montre la configuration principale du système d'alimentation d'une station de télécommunications. Comme il est observé, un système d'alimentation en courant continu de 48 V est adopté dans de tels sites pour des fins de sécurité associées à l'utilisation d'une tension continue élevée. À partir du bus CA, les équipements électroniques de la station sont alimentés via les convertisseurs AC/DC. Cependant, l'éclairage et la climatisation sont alimentés directement en AC à travers bus CA. Il est à noter que le système électronique constituant la station de télécommunications, est très sensible aux variations de tension. Par conséquent, un système de stockage est indispensable pour faire face aux fluctuations d'alimentation d'entrée.

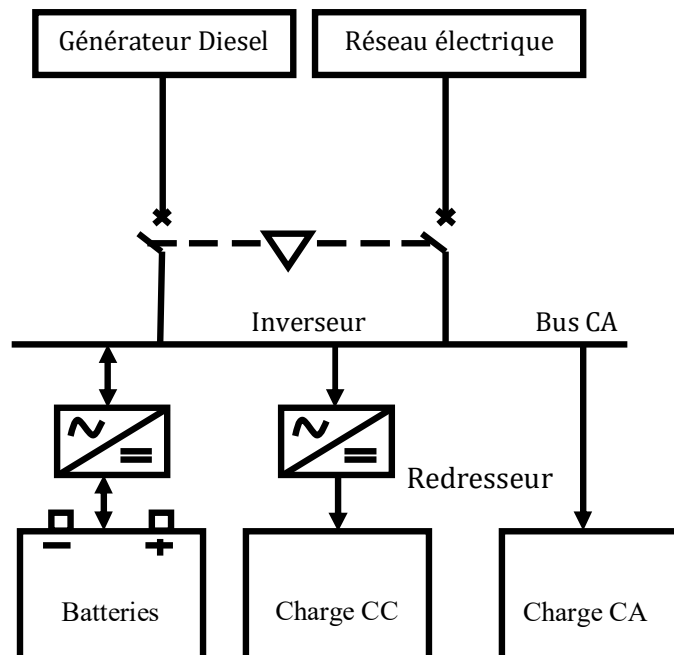


Figure I.16 : Configuration d'un système d'alimentation d'un site de télécommunications

I.8.2 Consommation énergétique des différents composants d'un site de télécommunications

D'après [7], la consommation électrique des différents composants des stations de télécommunications est récapitulée sur la figure I.17.

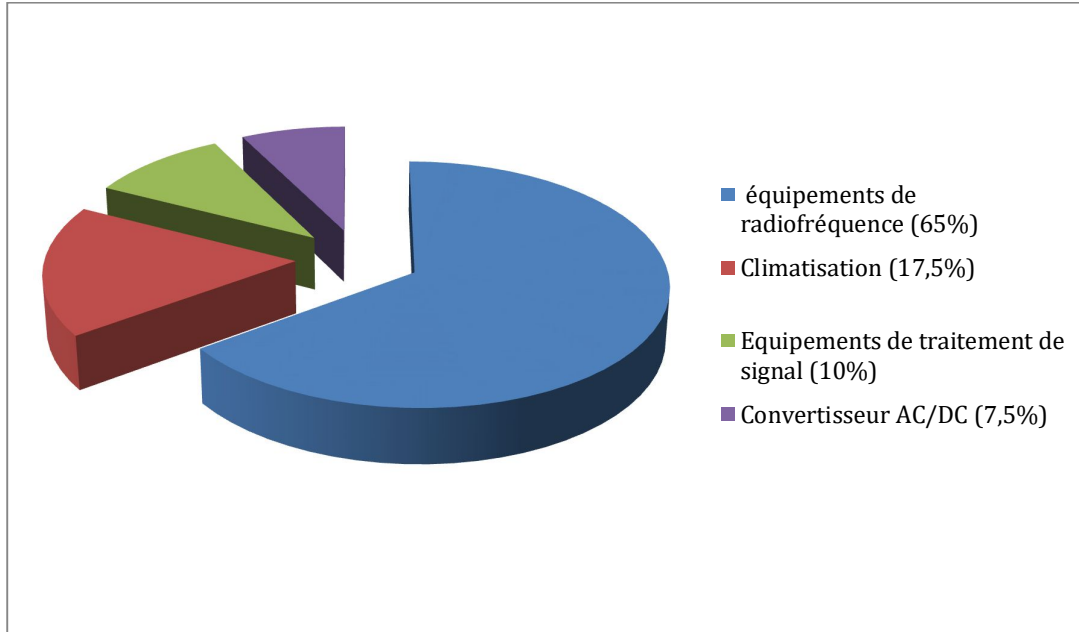


Figure I.17: Consommation énergétique des différents composants d'un site de télécommunications

La figure I.17 montre que le plus gros consommateur d'énergie dans les stations de télécommunications c'est l'équipement de la radiofréquence (amplificateur de puissance en plus des émetteurs-récepteurs et les câbles), qui consomme environ 65% de l'énergie totale. Parmi les autres composants de la station, les principaux consommateurs d'énergie sont la climatisation (17,5%), les équipements du traitement du signal numérique (10%) et le convertisseur AC/DC (7,5%).

I.8.3 Consommation électrique et classification des stations de télécommunications

La visite de plusieurs sites hébergeant des stations de télécommunications a permis de classer les stations en fonction de leur consommation énergétique. On trouve deux types de stations dont les équipements sont placés soit au sol et en intérieur (indoor), ou bien les stations d'architecture distribuée et en extérieur (outdoor). Donc, il existe deux plages de consommation électrique [7] :

- Les stations de base traditionnelles (indoor) ayant une consommation électrique moyenne (consommation allant de 3 000 kWh/mois et 10 000 kWh/mois).

- Les stations de base d'architecture distribuée et d'extérieur (outdoor) ayant une faible consommation électrique (consommation inférieure à 3 000 kWh/mois) [8].

I.9 Problématique d'alimentation des sites de télécommunications

Pour alimenter les stations de base qui ne sont pas raccordées au réseau électrique, on a souvent opté pour des générateurs diesel. Toutefois, le prix du diesel a beaucoup augmenté dans de nombreux endroits, de même que le coût du transport du carburant dans des zones isolées.

A cet effet, promouvoir l'utilisation de sources d'énergies renouvelables par le secteur de la téléphonie mobile, permettra sans doute d'économiser plusieurs milliards de litres de diesel par an et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cela permettra aussi de stimuler la fourniture de services de téléphonie mobile dans des endroits où ces services ne sont pas encore disponibles.

Comme alternatives au diesel, des études ont analysé la viabilité d'autres sources d'énergie pour les stations de base mobiles: solaire, éolienne, biodiesel, pico-hydro (systèmes hydroélectriques très petits) et piles à Combustible.

I.9.1 Energie solaire

Dans les zones rurales des pays en développement, le soleil brille souvent en abondance. Ces conditions, conjuguées à la disponibilité croissante d'équipements solaires et à leurs coûts d'exploitation relativement bas, font que l'énergie solaire est souvent retenue pour les sites de télécommunications.

I.9.2 Energie éolienne

Les équipements destinés à piéger l'énergie éolienne sont meilleur marché que les équipements solaires pour les stations qui ont des besoins énergétiques standards. Toutefois, la solution de l'énergie éolienne n'est viable que dans des zones telles que les régions côtières ou montagneuses, là où le vent souffle suffisamment fort et fréquemment. Ailleurs, on peut recourir à des solutions hybrides combinant énergie éolienne et énergie solaire.

I.9.3 Pico-hydro

La pico-hydro désigne des générateurs hydroélectriques très petits qui produisent généralement jusqu'à 10 kW à partir de l'énergie des torrents et des rivières. C'est une

technologie au point pour d'autres applications, par exemple l'électrification des zones rurales, et elle compte parmi celles qui nécessitent le moins d'investissements. Mais là encore, elle n'est applicable que dans un nombre limité d'endroits.

I.9.4 Biodiesel

Dans les générateurs de station de base, on peut remplacer directement le diesel classique par du biodiesel (obtenu à partir d'huiles végétales ou de graisses animales), mais ce n'est pas forcément une solution universelle. Parmi les facteurs à prendre en considération, citons l'accès local à des sources de biodiesel et les incidences possibles de la production de biodiesel sur l'agriculture.

I.9.5 Piles à combustible

Les piles à combustible sont principalement utilisées comme alimentation électrique de secours pour les stations de base qui ont des besoins énergétiques limités. Jusqu'à présent, la viabilité commerciale de l'utilisation de piles à combustible comme principale source d'alimentation électrique a été peu évaluée. Toutefois, des activités de recherche et développement sur cette technologie sont actuellement entreprises, et des fournisseurs prévoient une réduction des coûts. [9]

I.10 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une description complète d'un site de télécommunications. Ainsi, nous avons montré ses différentes caractéristiques, et son système d'alimentation. D'autre part, nous avons expliqué de manière simple et compréhensible le domaine des télécommunications. Par conséquent, ce chapitre a été réalisé pour faciliter la compréhension et simplifier les interprétations, dont le but était de savoir comment l'énergie est consommée dans les différentes configurations existantes des sites de télécommunications, dans le chapitre suivant consacré à la modélisation et la simulation des systèmes hybrides alimentant un site de télécommunications.

Chapitre II

Modélisation et simulation d'un système hybride alimentant un site de télécommunications

II.1 Introduction

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans les unités de production d'électricité de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Ce qui représente un lourd fardeau financier pour l'électrification des sites isolés. Pour palier à ce problème, il faut penser à l'idée de produire l'électricité sur les lieux de consommation. Parmi les technologies les plus utilisées pour la production d'énergie décentralisée on trouve le groupe électrogène diesel comme une solution classique et les panneaux photovoltaïques comme une solution nouvelle. Les problèmes liés à l'utilisation du combustible fossile pour le groupe électrogène et l'intermittence de la source d'énergie renouvelable pour le photovoltaïque à amener les chercheurs à inventer une autre technique qui combine les deux technologies « cités précédemment » dans un système hybride. Dans la majorité des cas, un système hybride autonome exige des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie [10-11].

Notre pays occupe une position géographique stratégique, favorisant l'épanouissement et l'utilisation des énergies renouvelables et particulièrement de l'énergie solaire et tout particulièrement pour les régions sahariennes et dans les endroits reculés où l'énergie électrique n'est pas très développée, et c'est pourtant ces régions qui sont caractérisées par plusieurs facteurs favorisant l'utilisation de l'énergie photovoltaïque et ceci étant principalement due à la présence d'un fort ensoleillement et une demande énergétique pas très importante. Dans le cadre de ce chapitre, nous proposons l'élaboration des modèles mathématiques pour les différents composants d'un système hybride pilote contenant un générateur photovoltaïque, un groupe électrogène, un stockage par batterie ainsi que d'autres composants de conversion et de commande. Le recours à la modélisation de cette nouvelle technologie est nécessaire afin d'approfondir les connaissances et de maîtriser l'exploitation de ce type d'installation.

En effet, il est important de signaler la nature aléatoire des conditions météo, ainsi, le profil du consommateur est également non déterminé. Donc il est intéressant de prévoir le fonctionnement du système hybride dans différentes situations [12-13].

II.2 Gisement solaire en Algérie

L'Algérie est située entre 36°42' de latitude nord et 03°13' de longitude est, ce qui en fait un endroit idéal pour l'utilisation de l'énergie solaire. Le rayonnement solaire journalier varie entre 3,8 et 6,5 KWh/m², et il est à noter que l'Algérie possède l'un des plus grands gisements solaires au monde. Le taux d'ensoleillement annuel moyen dépasse 3000 heures. C'est aussi le plus important de tout le bassin méditerranéen avec 169440 TWh/an. L'énergie solaire moyenne reçue est de 1700 KWh/m²/an dans les régions côtières, 1900 KWh/m²/an dans les hauts plateaux et 2650 KWh/m²/an au Sahara. Notre pays peut donc couvrir une partie de ses besoins énergétiques avec des systèmes photovoltaïques [14].

La figure suivante, représente la moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale en Algérie (insolation en KWh/m²). On remarque que la partie sud est caractérisée par des valeurs d'insolations importantes [15-16].

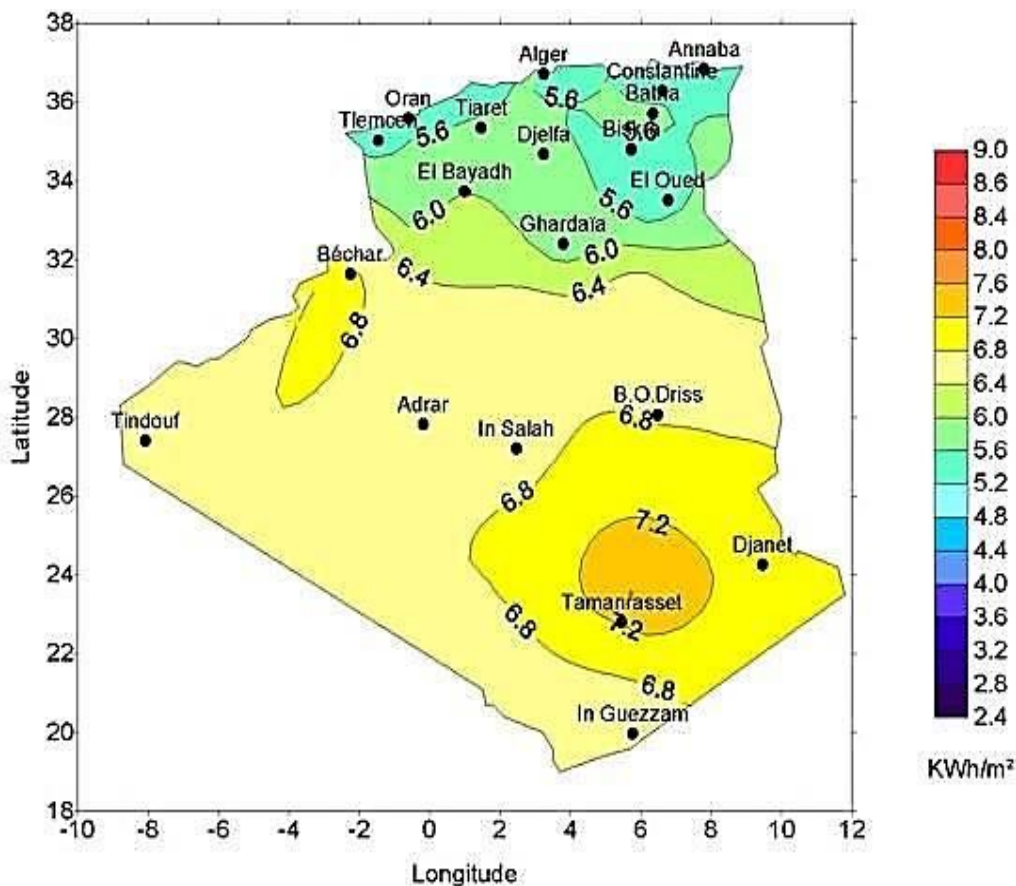


Figure II.1 : Gisement solaire en Algérie

II.3 Présentation des systèmes hybrides

Le système hybride de production de l'énergie, dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Le système qui nous intéresse regroupe trois parties, à savoir l'éolienne, le photovoltaïque, et comme appoint un groupe électrogène. Ces trois sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique. L'ajout du groupe électrogène à un système de production d'énergies renouvelables peut d'une part augmenter la fiabilité du système, alimenter des charges plus énergétivores et, d'autre part, diminuer de manière importante le coût de l'électricité produite par une diminution importante de la taille des générateurs solaire et éolien [17].

Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (tableau II.1).

Tableau II.1 : Classification des SEH par gamme de puissance

Puissance du SEH (KW)	Application
Faible : < 5	Systèmes autonome : stations de télécommunications, pompage de l'eau, autre application isolés
Moyenne : 10-250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales
Grande : > 500	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

Les grandes installations de SEH en site isolé peuvent être classifiées en fonction du degré de pénétration de l'énergie renouvelable défini par la proportion de la puissance (énergie) produite par les sources d'énergie renouvelable et la puissance demandée par la charge demandée.

II.4 Principaux composants des systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride sont en général constitués de sources d'énergie classique (groupe électrogène), de sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire). Ils peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydroélectrique, marémotrice, géothermique etc, des convertisseurs statiques, des systèmes de stockage (batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène...), des charges principales et de délestages et un système de surveillance [18].

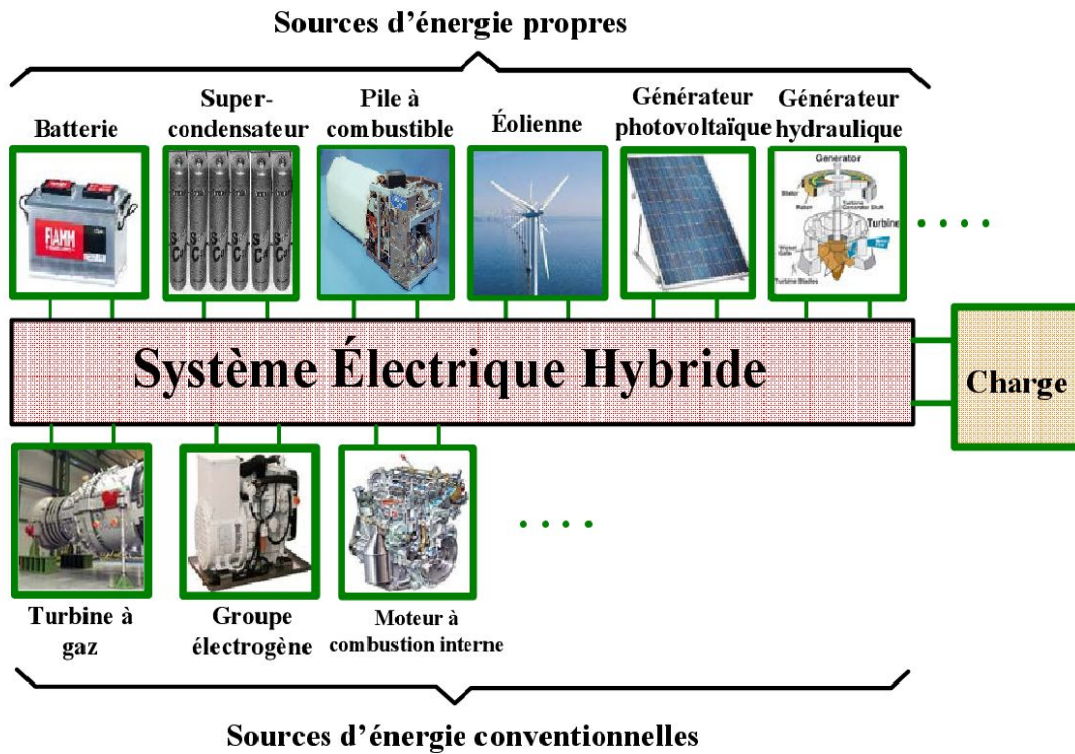


Figure II.2 : Différents sources utilisables dans un système électrique hybride.

II.4.1 Sources d'énergie renouvelables (Générateurs photovoltaïques)

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus à sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau. La circulation des électrons dans le circuit extérieur permet à la cellule PV de fonctionner comme un générateur. Les cellules PV sont combinées ensemble pour former un module PV qui peut produire une certaine quantité d'énergie sous des conditions d'éclairement et de température variables. Par la suite les modules PV peuvent être regroupés à leur tour afin de former un générateur PV. Il est dimensionné selon la puissance nécessaire pour une installation donnée.

La plupart des cellules PV mesurent autour de 100 cm² et ne produisent qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Le rendement énergétique d'un module dépend de la nature des matériaux utilisés. Les valeurs communément rencontrées sont de l'ordre (13 à 16 % pour les cellules composées de silicium monocristallin, 11 à 13 % avec du silicium poly cristallin et 7 à 8 % avec du silicium amorphe). Les modules PV sont protégés par des diodes by-pass

(diode by-pass, diode anti-retour) afin d'éviter le fonctionnement inverse des cellules occultées, pouvant entraîner une surchauffe voire une destruction de celles-ci.

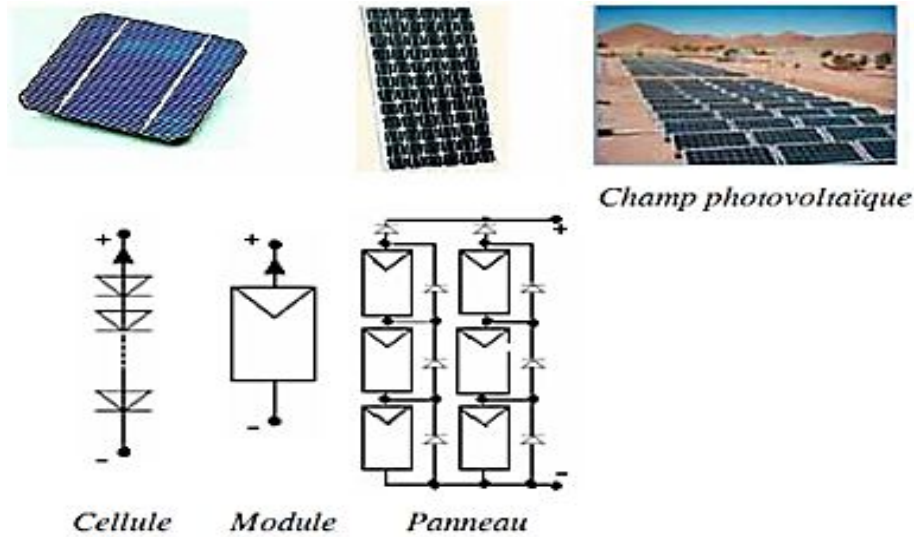


Figure II.3 : Passage d'une cellule à un champ photovoltaïque

II.4.2 Sources d'énergie conventionnelles

Les sources d'énergie conventionnelles (par opposition aux énergies renouvelables), utilisent les combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel, pour produire l'énergie électrique. C'est le cas par exemple des groupes électrogènes, des turbine à gaz entraînent des alternateurs, des moteurs à combustion internes. Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone.

II.4.2.1 Système de stockage

Le stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie hybride en site isolé. Dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont d'habitude du type plomb - acide. Les batteries nickel - cadmium sont rarement utilisées. La technologie des batteries plomb-acide bénéficie en effet d'avantages, tels son faible coût (par rapport à d'autres technologies) et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce.

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même

des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme.

II.4.2.2 Système de supervision

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système. Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants. Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.

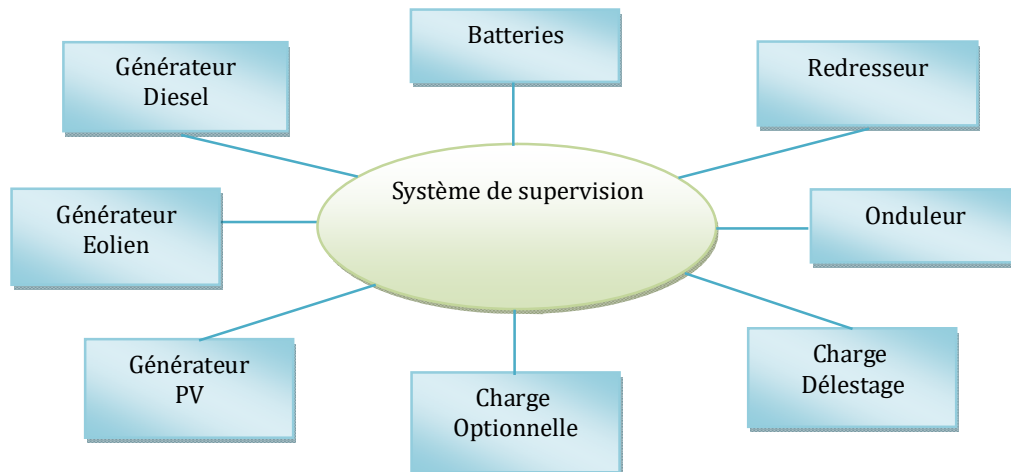


Figure II.4 : Système de supervision.

II.4.2.3 Convertisseurs

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu (CC) en à courant alternatif (CA) et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs. Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement ils sont généralement monophasés ou triphasés.

Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome

pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge.

Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources.

II.4.2.4 Charges

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

On peut potentiellement envisager l'utilisation d'un système d'énergie hybride via des alternatives énergétiques possédant les mêmes propriétés que les hydrocarbures tel que : les énergies renouvelables pour tout système nécessitant de l'énergie. Néanmoins, aujourd'hui, la mise en application de ce type de systèmes reste encore limitée aux sites isolés. Il reste à fournir d'importants efforts de recherche et de développement afin de démontrer leur viabilité et d'identifier des applications bien adaptées à leur utilisation. Des recherches sont en cours pour améliorer le coût et le rendement des composants du système (rendement des panneaux solaires, des aérogénérateurs, convertisseurs, etc.). On recense à l'heure actuelle de nombreux projets de réalisation de systèmes électriques, intégrant entre autres, des sources renouvelables et un stockage d'énergie via batteries de stockage et hydrogène, installation isolée.

II.5 Modélisation de la consommation électrique des stations de télécommunications

La station de base radio représente la principale partie consommatrice d'énergie du réseau cellulaire. La station de base radio consomme environ 60% de l'énergie totale du RAN (réseau d'accès radio). Pour cette raison, une estimation précise de la consommation électrique de la station de base est une étape importante dans l'évaluation de l'efficacité énergétique du RAN (réseau d'accès radio). Les sites de stations de base peuvent varier en termes de conception (c'est-à-dire intégrés ou distribués) et de type (macro, micro, pico, etc.) en fonction de la forme et de la taille des

cellules de dessert. Cependant, chaque site de station de base se compose de sept unités clés communes : le système d'antennes et de câbles d'alimentation, l'amplificateur de puissance (AP), l'unité de traitement de bande de base, l'unité de raccordement, le système de refroidissement ; et le bloc d'alimentation CA/CC.

La modélisation de la consommation électrique des stations de base implique généralement une phase intensive de mesures de la consommation électrique des stations de base radio dans différents environnements et conditions de fonctionnement. Un certain nombre de modèles de consommation électrique des stations de base sont disponibles dans la littérature ouverte. Ces modèles fournissent une estimation de la puissance opérationnelle de la station de base et de sa dépendance vis-à-vis de la puissance émise RF (radio-fréquence). La consommation électrique de la station de base dans la plupart des modèles existants est caractérisée par la somme de deux parties, une partie aérienne statique et une partie dynamique. La partie statique consiste en une puissance de sur débit qui dépend de la station de base et de la conception, mais elle ne dépend pas de la puissance RF transmise. Il comprend la puissance consommée dans l'unité de traitement en bande de base, l'émetteur-récepteur RF, l'unité d'alimentation AC/DC et l'unité de refroidissement. Tandis que la partie dynamique est constituée d'une puissance qui dépend de la charge de trafic moyenne offerte et comprend les pertes dans l'amplificateur de puissance ainsi qu'une partie des unités d'alimentation et de refroidissement [19].

II.5.1 Estimation de la consommation électrique de la station de base

Les unités de station de base séparées sont classées en : par unités d'antenne, qui incluent l'amplificateur de puissance (AP) et l'émetteur-récepteur RF ; par unités de secteur, qui incluent l'unité de traitement de bande de base et l'unité d'alimentation ; et par unités de site de station de base, qui comprennent les unités de refroidissement et de liaison. La consommation électrique moyenne globale du site de la station de base est modélisée comme la somme de la consommation électrique des sept unités, telle qu'exprimée dans les équations (II.1) et (II.2).

$$P_{site} = P_{cool} + P_{rect} + P_{bk} + P_{bts} \quad (II.1)$$

$$P_{bts} = n_s \cdot n_t (P_{bb} + P_{trx} + P_{pa}) \quad (II.2)$$

Dans l'équation (II.1), le terme P_{site} représente la consommation électrique totale du site de la station de base, P_{cool} désigne la consommation électrique du système de refroidissement, P_{rect} est la puissance consommée par l'unité d'alimentation, P_{bk} est la consommation électrique du backhaul (c'est le réseau de liaison englobant les liaisons intermédiaires qui relient les sites de stations de base au réseau central), et P_{bts} est la consommation électrique de la station émettrice-réceptrice de base. Dans l'équation (II.2), le terme P_{bb} est la consommation d'énergie de traitement du signal en bande de base, P_{trx} est la consommation électrique de la station émettrice-réceptrice RF, P_{pa} est la puissance consommée dans l'amplificateur de puissance, n_s fait référence au nombre de secteurs par site et n_t est le nombre d'antennes d'émission par secteur. La consommation électrique de l'unité de refroidissement et d'alimentation est calculée en pourcentage de P_{bts} . La méthode d'estimation de la consommation électrique de chaque unité est expliquée dans les sous-sections suivantes.

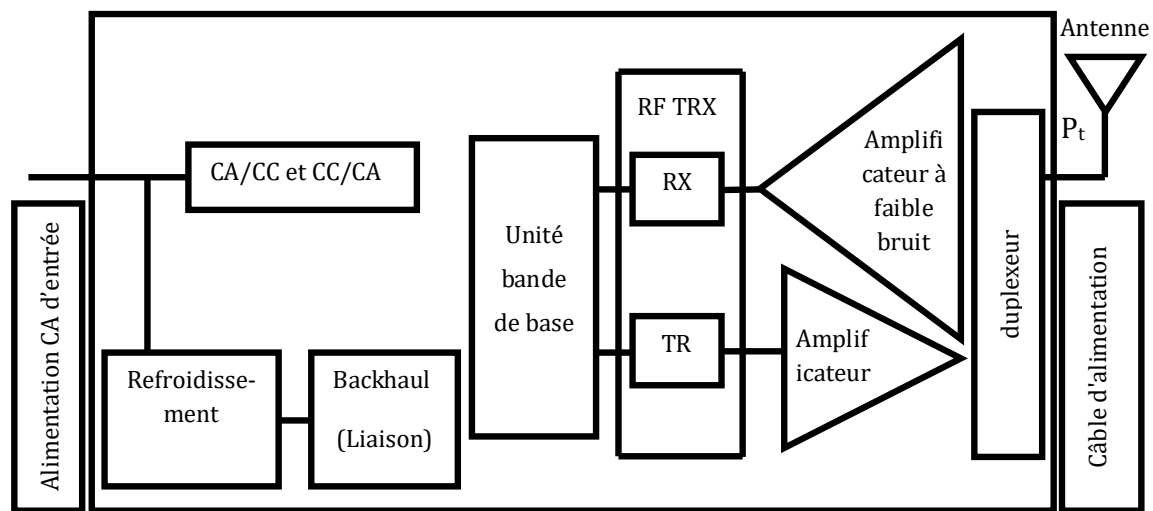


Figure II.5 : Schéma fonctionnel du site de la station de base

En télécommunications, un réseau de backhaul, appelé au Québec réseau d'amenée et dans la plupart des pays anglophones backhaul network ou backhauling, est un réseau intermédiaire, permettant par exemple, l'émission et la réception de données entre un centre de radiodiffusion et une station terrestre d'un réseau.

II.5.2 Amplificateur de puissance

L'amplificateur de puissance (AP) représente généralement l'unité de consommation d'énergie principale dans la station de base et peut consommer plus de 50% de la puissance totale de la station de base. La consommation électrique de

l'amplificateur de puissance peut être exprimée en fonction de la puissance RF moyenne transmise par antenne, du rendement de l'amplificateur de puissance η_{pa} et des pertes du câble d'alimentation σ_{feed} , comme indiqué dans l'équation (II.3)

$$P_{pa} = \frac{P_t}{n_t \cdot \eta_{pa} \cdot (1 - \sigma_{feed})} \quad (II.3)$$

Où la puissance RF émise P_t est exprimée en fonction de la charge de trafic moyenne offerte normalisée α , comme indiqué dans l'équation (II.4)

$$P_t = \alpha \cdot P_{t,max} \quad (II.4)$$

Dans (II.4) $P_{t,max}$ est la puissance RF maximale transmise par secteur tandis que α désigne la charge moyenne offerte pendant un temps d'observation approprié et a une valeur comprise entre 0 et 1. Lorsque α est égal à l'unité, toutes les ressources RF sont affectées tout le temps, et la station de base émet à la puissance maximale $P_{t,max}$. En raison du rapport de puissance crête sur puissance moyenne dans les signaux multi porteuses, l'amplificateur de puissance doit fonctionner à un niveau de puissance relativement faible, par rapport au niveau de puissance de saturation maximal $P_{t,max}$. Cela permet d'éviter la distorsion des pics de signal par la région de saturation de l'amplificateur de puissance (AP), ce qui conduit alors à une dégradation de l'efficacité de l'amplificateur de puissance. La valeur de l'efficacité de l'amplificateur de puissance η_{pa} à différentes valeurs de charge doit être mesurée expérimentalement pour être précise, elle peut également être approximée par l'équation (II.5)

$$\eta_{pa} = \sqrt{\frac{P_t}{P_{pa,max}}} \cdot \eta_{pa,max} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot P_{t,max}}{P_{pa,max}}} \cdot \eta_{pa,max} \quad (II.5)$$

Dans l'équation (II.5), le terme $\eta_{pa,max}$ est l'efficacité maximale de l'amplificateur de puissance (AP), qui est atteinte lorsque l'amplificateur de puissance fonctionne à $P_{t,max}$.

II.5.3 Unité d'émetteur-récepteur RF

L'émetteur-récepteur RF contient des éléments qui sont responsables du traitement RF dans la station de base. Ces éléments comprennent un circuit pour la génération et la distribution d'horloge/porteuse, des modulateurs, des filtres, des tampons, un amplificateur à faible bruit et les convertisseurs analogiques/numériques. La consommation électrique de l'émetteur-récepteur RF varie en fonction du nombre d'antennes d'émission et de la bande passante du système B . Par conséquent, la consommation d'énergie de l'émetteur-récepteur RF par secteur peut être estimée par

l'équation (II.6) de la consommation d'énergie d'une configuration de station de base de référence est disponible.

$$P_{trx} = \frac{n_t \cdot B \cdot P_{trx,ref}}{B_{ref}} \quad (II.6)$$

Dans l'équation (II.6), le terme $P_{trx,ref}$ est la consommation d'énergie de l'émetteur-récepteur RF à une bande passante de référence B_{ref} avec une antenne d'émission par secteur.

II.5.4 Unité de traitement en bande de base

L'unité de traitement en bande de base (BB) est responsable du traitement du signal, de la gestion des ressources radio et de la fonctionnalité de contrôle du site. Similaire à l'émetteur-récepteur RF, la consommation d'énergie de l'unité BB est généralement modélisée comme dépendant du nombre d'antennes d'émission et de la bande passante du système. La consommation d'énergie de cette unité dépend relativement peu de la charge de trafic moyenne, et sa consommation d'énergie peut être considérée comme indépendante de la charge. Une expression pour la consommation d'énergie BB est fournie dans l'équation (II.7), où $P_{bb,ref}$ est la consommation d'énergie unitaire BB à une largeur de bande de référence B_{ref} avec une antenne d'émission par secteur.

$$P_{bb} = \frac{n_t \cdot B \cdot P_{bb,ref}}{B_{ref}} \quad (II.7)$$

II.5.5 Bloc d'alimentation

L'unité d'alimentation comprend les convertisseurs CA/CC et CC/CC au sein du site de la station de base. Les pertes de puissance dans ce P_{rect} sont généralement modélisées comme un pourcentage fixe de la consommation électrique globale de la station de base. Les valeurs par défaut communes de ces pertes vont généralement de 10 % à 15 %.

II.5.6 Unité de refroidissement

Le refroidissement du site est requis sur les sites des stations de base macro cellulaires afin de maintenir une température de fonctionnement appropriée à l'intérieur de l'armoire de la station de base. La consommation électrique de l'unité de refroidissement dépend de la consommation électrique de la station de base, des températures interne et ambiante de la station de base armoire et sur l'efficacité

énergétique de l'unité de refroidissement. Les estimations typiques de la consommation électrique de l'unité de refroidissement vont de 10 % à 30 % de la consommation électrique totale de la station de base. Un modèle théorique pour estimer la consommation électrique des unités de refroidissement est présenté dans ce chapitre. Les études précédentes utilisaient principalement des données empiriques, qui peuvent différer d'un site de station de base à un autre. Lors de l'estimation de la consommation électrique de l'unité de refroidissement, une température ambiante de 25 °C est généralement prise en compte. La quantité de chaleur générée à l'intérieur de l'armoire est obtenue en supposant que la puissance totale consommée par l'équipement à l'intérieur de l'armoire, notée P_c , est dissipée sous forme de chaleur et peut être calculée en British Thermal Unit (BTU) par heure par l'équation (II.8)

$$\text{BTU par Heure} = 3.4121 \cdot P_c \quad (\text{II.8})$$

La valeur de P_c est alors donnée par l'équation (II.9)

$$P_c = P_{bts} - \frac{n_s \cdot P_t}{1 - \sigma_{feed}} \quad (\text{II.9})$$

Lors du calcul de P_c dans l'équation (II.9), les pertes dans le câble d'alimentation σ_{feed} et le nombre de secteurs n_s est pris en compte lors de la soustraction de la puissance RF émise par secteur de la consommation électrique de la station émettrice-réceptrice de base. L'efficacité énergétique d'une unité de refroidissement est déterminée par sa cote d'efficacité énergétique qui indique le nombre de BTU par heure supprimés pour chaque watt de puissance consommé. Le ratio d'efficacité énergétique (EER) est généralement indiqué sur l'unité par une étiquette énergétique. Plus la valeur EER est élevée, plus l'efficacité énergétique de l'unité de refroidissement est élevée, par conséquent, la consommation électrique de l'unité de refroidissement peut être estimée par l'équation (II.10).

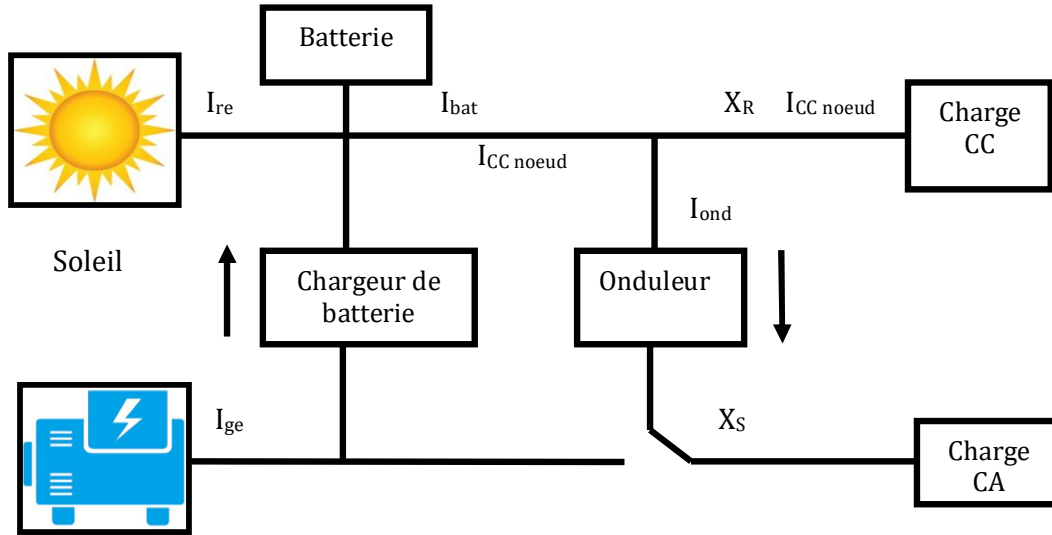
$$P_{cool} = \frac{\text{BTU per Heure}}{\text{EER}} \quad (\text{II.10})$$

II.5.7 Unité de backhaul (Unité de liaison)

Le réseau backhaul englobe les liaisons intermédiaires qui relient les sites des stations de base au réseau central. Différentes technologies de communication sont utilisées dans le backhaul telles que la fibre optique, le fil de cuivre ou la liaison micro-ondes. La plupart des études sur la consommation d'énergie dans les réseaux macro-cellulaires ont tendance à omettre la puissance fournie par le backhaul P_{bk} .

II.6 Modélisation du système hybride PV/diesel

Dans ce qui suit, nous allons proposer un modèle du système hybride PV/Diesel avec stockage et par la suite faire une simulation en vue de faire sortir les dimensions optimales du système pour un profil de consommation donné [20-21].



Groupe électrogène

Figure II.6 : Schéma de principe PV-Groupe électrogène avec stockage

Le modèle énergétique est le suivant :

$$I_{CA\ charge} = I_{ond} \cdot eff_{ond} \left(\frac{U_{cc}}{U_{ca}} \right) X_S + (1 - X_{RD}) I_{ge} \cdot (1 - X_S) \quad (II.11)$$

$$\text{Avec } I_{ond} = (1 - X_R) \cdot \left(I_{re} - I_{bat} + eff_{bc} \cdot \left(\frac{U_{ca}}{U_{cc}} \right) \cdot I_{ge} \cdot X_{RD} \right) \quad (II.12)$$

Pour une charge en alternatif $X_R = 0$ (pas de charge CC), le modèle devient :

$$I_{CA\ charge} = (1 - X_R) \cdot \left(I_{re} - I_{bat} + eff_{bc} \cdot \left(\frac{U_{ca}}{U_{cc}} \right) \cdot I_{ge} \cdot X_{RD} \right) eff_{ond} \left(\frac{U_{cc}}{U_{ca}} \right) X_S + (1 - X_{RD}) I_{ge} \cdot (1 - X_S) \quad (II.13)$$

Avec :

I_{re} : Le courant fourni par les panneaux

I_{bat} : Le courant délivré par la batterie

I_{ge} : Le courant fourni par le groupe électrogène

eff_{bc} : Le rendement du redresseur

eff_{ond} : Le rendement de l'onduleur

X_{RD} : est la part de courant de charge du groupe électrogène exprimé en pourcentage

X_S : donne la position de l'onduleur (fermé ou ouvert)

Si $X_S = 1$: l'onduleur est ON et c'est le générateur PV seulement qui alimente la charge

Le modèle devient :

$$I_{CA\ charge} = \left(I_{re} - I_{bat} + eff_{bc} \cdot \left(\frac{U_{ca}}{U_{cc}} \right) \cdot I_{ge} \cdot X_{RD} \right) \cdot eff_{ond} \left(\frac{U_{cc}}{U_{ca}} \right) \quad (II.14)$$

$$\text{Et } (1 - X_{RD}) I_{ge} = 0 \quad (II.15)$$

Si $X_S = 0$: l'onduleur est OFF et c'est le groupe qui alimente la charge et la batterie

$$I_{CA\ charge} = (1 - X_{RD}) I_{ge} \quad (II.16)$$

Pour $X_S = 0$ on doit s'assurer que le courant qui va dans l'onduleur est nul et non une perte.

Cela se vérifie par l'équation :

$$(X_{RD}) \cdot I_{ge} = \frac{I_{re} - I_{bat}}{eff_{bc} \times \frac{U_{ca}}{U_{cc}}} \quad (II.17)$$

Le courant du groupe électrogène I_{ge} déterminé à travers cette équation, permet de calculer le cout de l'énergie consommée.

II.6.1 Principe

Selon le profil de consommation sur une période donnée T, la production doit à chaque instant être égale à la demande :

$$L(T) = \sum_T P_C(t) = \eta_{PV} S_{ref} H_{\beta}(T) \quad (II.18)$$

$H_{\beta}(T)$: l'irradiation incidente sur les modules PV avec un angle β

S_{ref} : est la surface de référence (m²)

η_{PV} : le rendement du champ PV

$P_C(t)$: est la puissance instantanée demandée

Le modèle est conçu suivant la cinétique de la batterie c'est-à-dire pour une combinaison de SDM (est l'état de décharge de la batterie à partir duquel le groupe démarre) et SAR (est l'état de charge de la batterie à partir duquel le groupe s'arrête) on a la paire optimale (S_{dim} , C_{max}) qui nous permet d'obtenir la surface du module S_{dim} , la capacité de stockage de la batterie C_{max} , la puissance nominale du groupe électrogène donnée par la formule :

$$P_{chargeur}^0 = \frac{C_{max}}{5 \times \eta_{groupe}} \quad (II.19)$$

II.7 Présentation du système hybride

Sur la figure suivante, le système hybride est composé de quatre parties essentielles : un groupe électrogène diesel et un champ de panneaux photovoltaïques produisant de l'énergie renouvelable, et un système de stockage placé à côté de la charge et du site de télécommunications qui représente la charge. Dans l'élément suivante, nous définissons les dimensions de chaque élément de la figure II.7 séparément.

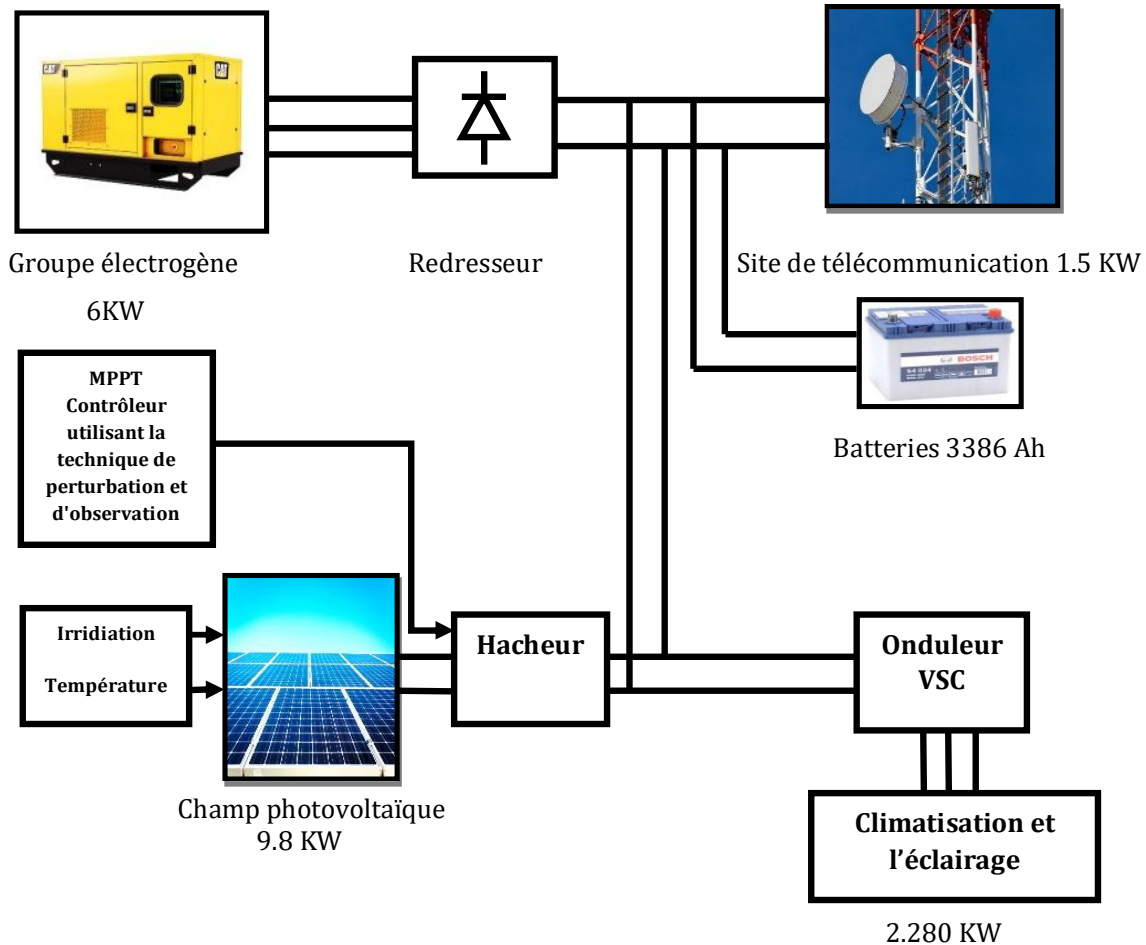


Figure II.7 : Simulation du système sur Matlab / Simulink

II.7.1 Dimensionnement d'un système de production d'électricité hybride photovoltaïque / groupe électrogène

Nous souhaitons électrifier un site de télécommunications, et nous connaissons alors les besoins en électricité. Compte tenu des ressources locales en énergie, nous souhaitons répondre à ces besoins électriques à l'aide d'un système hybride photovoltaïque / groupe électrogène [22-23].

II.7.1.1 Calcul de la puissance crête du champ PV

Comme l'irradiation varie de mois en mois, la puissance crête du champ photovoltaïque étudié varie au cours des mois de l'année, et le calcul de cette puissance est donné par l'équation (II.20) :

$$P_c = \frac{E_{bes} \times E_{stc}}{E_{mes} \times C_p} \quad (II.20)$$

Avec :

P_c : Puissance crête du champ photovoltaïque (W) ;

E_{bes} : Besoin journalier (Wh/j) ;

E_{stc} : Ensoleillement dans les conditions STC ($E_{stc} = 1000 \text{ W/m}^2$) ;

E_{mes} : Ensoleillement du site d'installation (kWh/j. (m²)) ;

C_p : Le ratio de performance du système ($C_p = 0.7$).

Ainsi, l'application numérique de cette étude de cas est la suivante :

$$P_c = \frac{36840 \times 1}{5,52 \times 0,7} = 9534.16 \text{ W}$$

II.7.1.1.1 Choix des modules

En fonction de la puissance totale requise par les charges ainsi que du type de notre installation (non raccordée au réseau), nous avons opté pour des modules photovoltaïques de type « Sun Power (SPR-305) » d'une puissance de 305,2 W_c chacun.

II.7.1.1.2 Calcul du nombre de panneaux photovoltaïques

Le nombre de modules de panneaux photovoltaïques est déterminé par l'équation (II.21) :

$$N_{pv} = \frac{P_{pv}}{P_{pv \text{ unitaire}}} \quad (II.21)$$

Avec :

N_{pv} : Nombre de panneau ;

P_c : Puissance totale de champs photovoltaïque ;

$P_{pv \text{ unitaire}}$: Puissance d'un module photovoltaïque.

Ainsi, l'application numérique de cette étude de cas est la suivante :

$$N_{pv} = \frac{9534}{305.2} = 31.2$$

Donc, si on opte pour un $N_{pv} = 32$ panneaux, la puissance crête du champ sera :

$$P_{pv} = 16 \times 305.2 = 9766.4 \text{ W}$$

II.7.1.2 Dimensionnement du parc de batteries

Le stockage d'énergie joue un rôle important dans un système énergétique hybride autonome. Dans la plupart des cas, les batteries restent la technologie la plus rentable.

II.7.1.2.1 Choix de la tension et calcul de la capacité

Nous choisissons des batteries avec une tension de 12 V chacune. Sachant que dans le cas de notre système ce sont les accumulateurs qui imposent la tension au champ PV. La batterie avec une capacité de stockage de 275 Ah de type « UCG 275-12 ». Pour le cas de notre charge, nous souhaitons avoir une autonomie de 3 jours. La capacité de champ des batteries standard est donnée par la relation :

$$C_B = \frac{J_{Auto} \times B_j}{V_B \times PMD \times K_B} \quad (II.22)$$

Avec:

C_B : Capacité total des batteries (Ah);

B_j : Besoin journalier (Wh/j);

J_{Auto} : Nombre de jour d'autonomie;

V_B : Tension de la batterie (V);

PMD: Profondeur maximale de décharge (80%);

K_B : Coefficient de température de la batterie (0.85).

Ainsi, l'application numérique pour cette étude de cas est :

$$C_B = \frac{36840 \times 3}{48 \times 0.8 \times 0.85} = 3386 \text{ Ah}$$

Pour notre système, nous constatons que le nombre de batteries est 12 sous forme de trois string, chaque string contient quatre batteries en série ce qui garde la même capacité de $C_B = 1100$ Ah pour chaque string donc la capacité finale se système stockage est 3300 Ah, ce qui assure une tension de $V = 48V$.

Tableau II.2 : Détail de la charge du site de télécommunications pendant une journée

Heures	Charge (KW)	Heures	Charge (KW)
00:00 - 01:00	1.300	12:00 - 13:00	1.850
01:00 - 02:00	1.300	13:00 - 14:00	1.850
02:00 - 03:00	1.300	14:00 - 15:00	1.850
03:00 - 04:00	1.300	15:00 - 16:00	1.850
04:00 - 05:00	1.300	16:00 - 17:00	1.850
05:00 - 06:00	1.280	17:00 - 18:00	2.000
06:00 - 07:00	1.260	18:00 - 19:00	2.000
07:00 - 08:00	1.180	19:00 - 20:00	1.280
08:00 - 09:00	1.180	20:00 - 21:00	1.280
09:00 - 10:00	1.940	21:00 - 22:00	1.300
10:00 - 11:00	1.940	22:00 - 23:00	1.300
11:00 - 12:00	1.850	23:00 - 24:00	1.300

Tableau.II.3 : Paramètres du modèle de simulation

Paramètre	Valeur
PV (KW)	9.8
Nombre des panneaux	32
Batteries (Ah)	3386
Nombre de batteries	12
Groupe électrogène (KW)	6
Tension sortie de l'hacheur abaisseur (V)	48
Tension sortie de l'onduleur abaisseur (V)	220
Rapport cyclique de PV	0.192
La charge du site de télécommunication (KW/J)	36.84

II.7.2 Description de système de simulation

La figure II.7 représente le modèle d'un champ photovoltaïque de 9.8 KW connecté à un site de télécommunication à travers un hacheur et un onduleur triphasé (VSC) avec un groupe électrogène de puissance 6 KW avec un redresseur. Une commande MPPT est implémentée en se basant sur les blocs fonctions de MATLAB.

Le système est composé de :

- Un champ photovoltaïque délivrant une puissance max de 9.8 kW à un ensoleillement de 1000 W / m².
- Un hacheur abaisseur afin de diminuer la tension du champ photovoltaïque, à 48 V DC.
- Un onduleur VSC pour convertir la tension continue délivrée par les panneaux en tension alternative de 220 V et de garder un facteur de puissance unitaire à sa sortie.
- Un redresseur, il permet de convertir la tension de 220 V à partir le groupe électrogène pour alimenter le système la BTS avec une tension de 48V au niveau du site télécommunications.
- Un groupe électrogène de puissance 6 KW.
- Des batteries de stockage avec capacité 3386 Ah, avec une tension 48 V DC.
- Une charge alternative (climatisation et l'éclairage) et une charge continue (station de base de l'émetteur-récepteur).

II.7.2.1 Le champ photovoltaïque

Notre champ photovoltaïque est composé de un champ photovoltaïque. Le champ PV d'une puissance de 9.8 kW, utilise 32 panneaux « SunPower (SPR-305) ». Il est constitué de 8 chaînes connectées en parallèle et chaque chaîne comporte 4 panneaux connectés en série ($8 * 4 * 305,2 \text{ W} = 9,8 \text{ kW}$) et correspond à la tension en circuit ouvert ($4 \text{ panneaux_Série} * V_{oc} = 4 * 64,2 = 256,8 \text{ V}$).

Les paramètres du panneau utilisé « SPR-305 » sont comme suit:

- Nombre de cellules connectées en série: 96
- Tension en circuit ouvert: $V_{co} = 64,2 \text{ V}$
- Courant de court-circuit: $I_{cc} = 5,96 \text{ A}$
- Tension et courant à la puissance maximale: $V_{mp} = 54,7 \text{ V}$, $I_{mp} = 5,58 \text{ A}$

Les caractéristiques I-V et P-V d'un module Sun Power (SPR-305) sont représentés par la figure II.8.

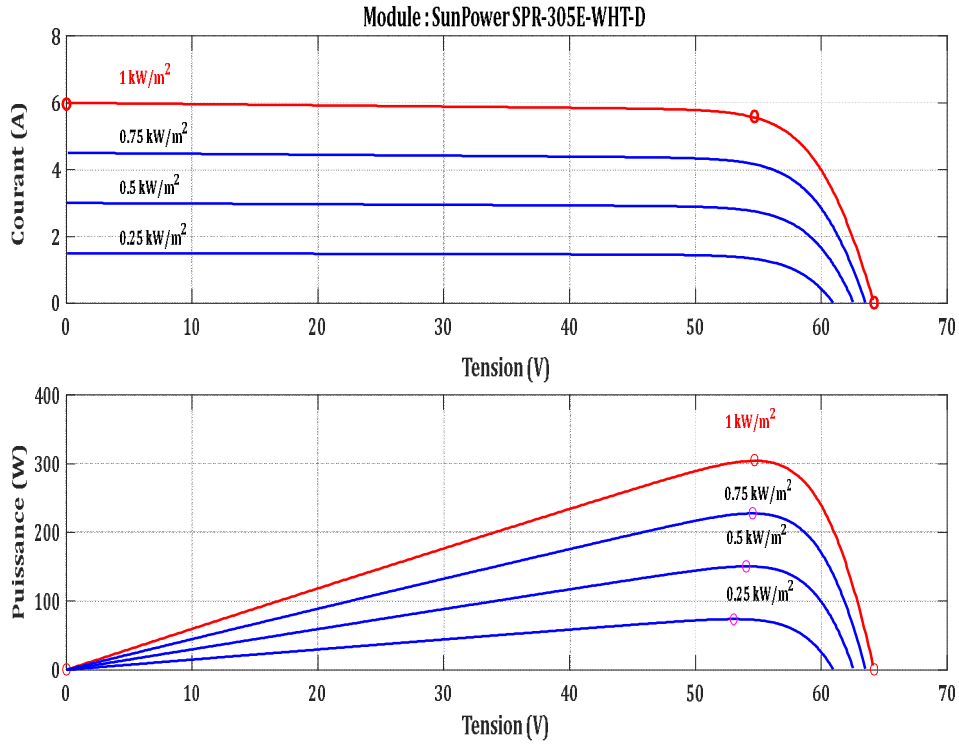


Figure II.8 : Caractéristiques I-V et P-V d'un module SunPower SPR-305E-WHT

Les caractéristiques du champ PV sont représentées ci-dessous par la figure II.9.

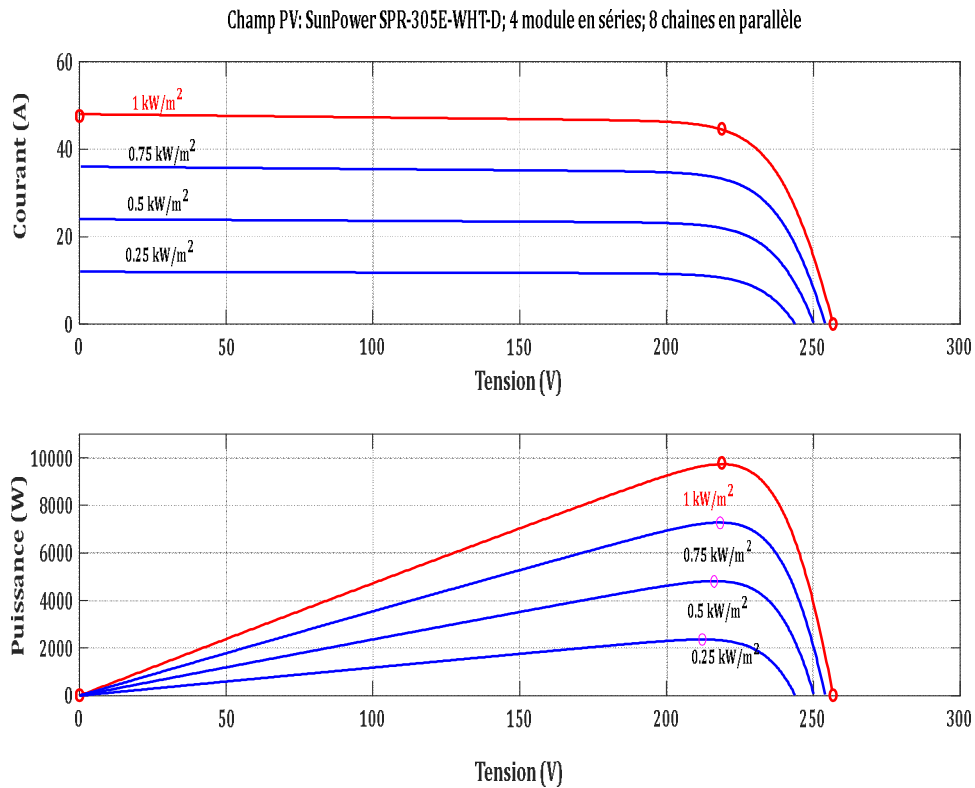


Figure II.9: Caractéristiques I-V et P-V du champ photovoltaïque PV

II.7.2.2 Hacheur abaisseur

Dans notre modèle, nous avons un hacheur qui diminue la tension continue délivrées par le champ PV à 48V. Le hacheur utilise une commande MPPT qui varie automatiquement le rapport cyclique afin de générer la tension requise pour extraire la puissance maximale.

II.7.2.3 Convertisseur VSC

Un VSC à trois niveaux est utilisé pour régler la tension continue à 48 V et maintenir un facteur de puissance unitaire. Le système de contrôle utilise deux boucles de contrôle: une boucle de contrôle externe qui régule la tension continue de liaison à +/- 250 V et une boucle de contrôle interne qui régule les courants Id et Iq (composants actives et réactives). La référence du courant Id est la sortie du régulateur externe de la tension continue. La référence du courant Iq est réglée à zéro afin de maintenir un facteur de puissance unitaire. Les tensions Vd et Vq sont des sorties du régulateur de courant. Ces tensions sont converties en trois tensions de références Uref_abc utilisées par le générateur d'impulsions MLI à trois niveaux.

II.7.2.4 Redresseur

Tout système d'alimentation fonctionnant à la fois avec un courant continu et un courant alternatif nécessite un convertisseur pour l'équipement comme le redresseur, il permet de convertir la tension de 220 V à partir le groupe électrogène pour alimenter le système la BTS avec une tension de 48V au niveau du site télécommunications.

II.8 Scénario

Le système hybride (champs photovoltaïques avec batteries et groupe électrogène) alimente le site de télécommunications en électricité pendant 24 heures. La présence d'un rayonnement suffisant amène le champ photovoltaïque à produire une puissance élevée pour alimenter la charge ; sinon, le système de stockage alimente la charge. En l'absence de rayonnement suffisant et l'incapacité du système de stockage à fournir de l'énergie, le groupe électrogène alimente la charge. À midi, on remarque le passage des nuages, ce qui affecte la production d'énergie générée par le champ photovoltaïque.

II.8.1 Résultats et discussion

Les résultats de simulation mettent en évidence l'importance et le rôle du système hybride dans les régions isolées ainsi que d'un point de vue économique et environnemental.

II.8.1.1 les courbes de tension et le courant avec le rapport cyclique et l'irradiation de système

De l'instant $t = 0$ s à $t = 0,05$ sec, les impulsions pour l'hacheur et le convertisseur VSC sont bloqués. La tension du champ photovoltaïque PV correspond à la tension en circuit ouvert ($4 \text{ panneaux_Série} * V_{oc} = 4 * 64,2 = 256,8 \text{ V}$) (voir figure II.10).

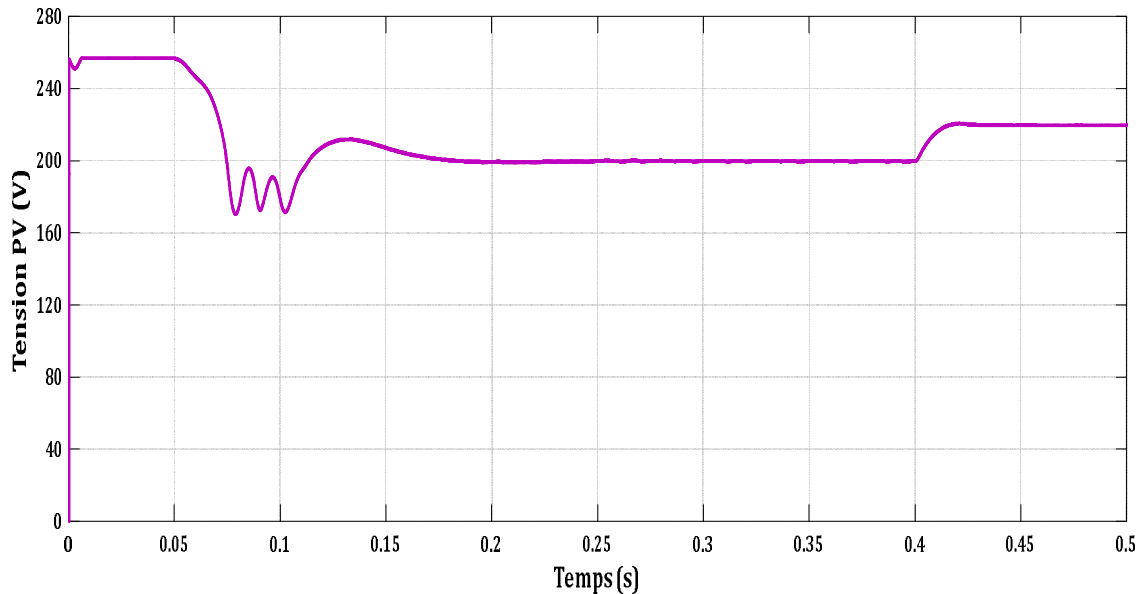


Figure II.10 : Tension générée par le champ PV

A l'instant $t = 0,2$ s, l'hacheur et le convertisseur VSC sont débloqués. La tension continue est réglée à $V_d = 48\text{V}$ (voir figure II.12). Le rapport cyclique du le hacheur abaisseur égale à 0,192 à partir la relation $V_s = D * V_e$ le cas du le hacheur abaisseur (Figure II.11) L'ensoleillement est réglé à 1000 W / m^2 comme le montre la figure II.13. Le régime nominal est atteint à l'instant $t = 0,25$ s la tension générée du champ PV est donc $V_{PV} = V_d / D = 48 / 0.192 = 250 \text{ V}$.

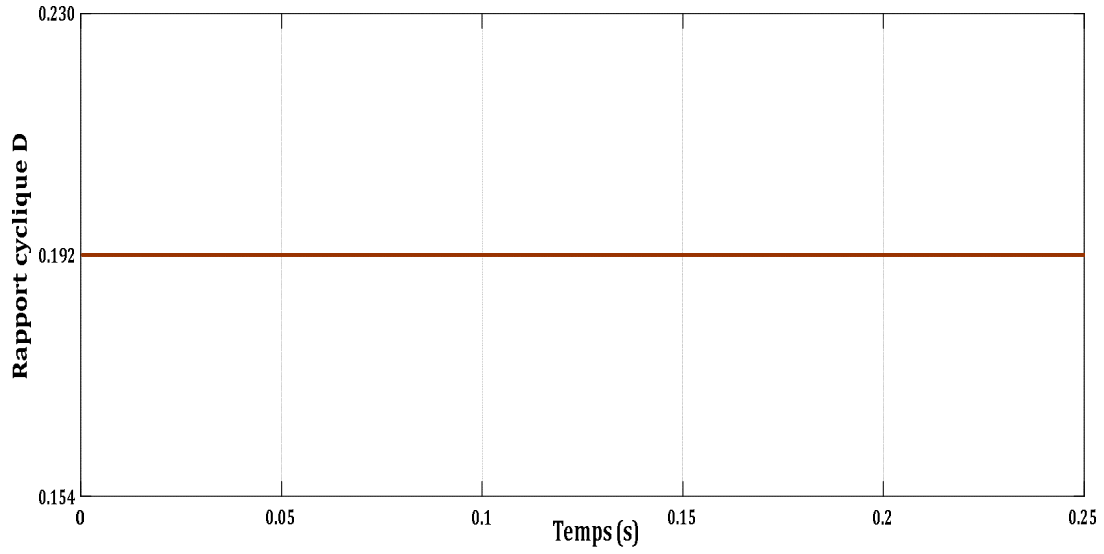


Figure II.11 : Rapport cyclique de PV

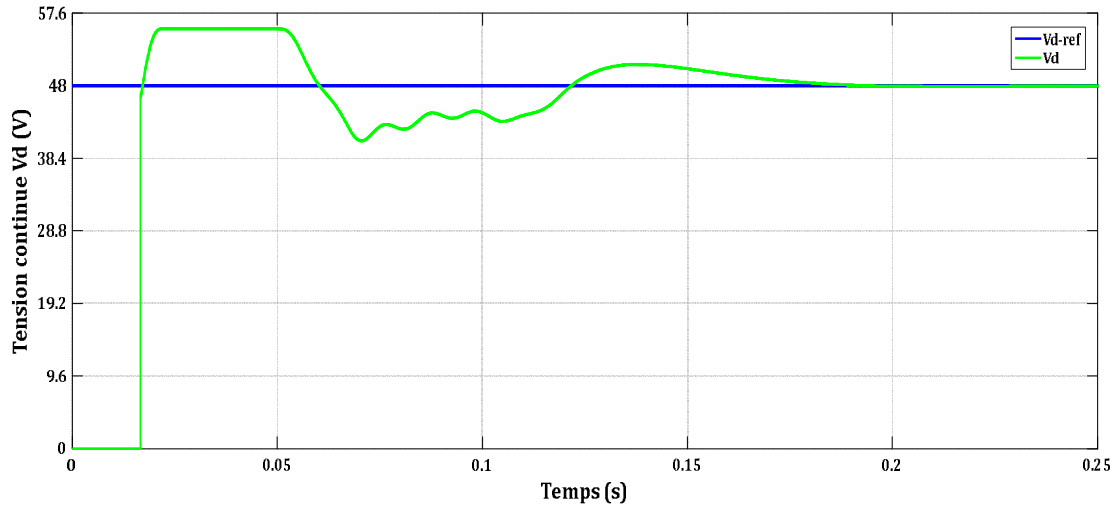


Figure II.12 : Tension continue Vd

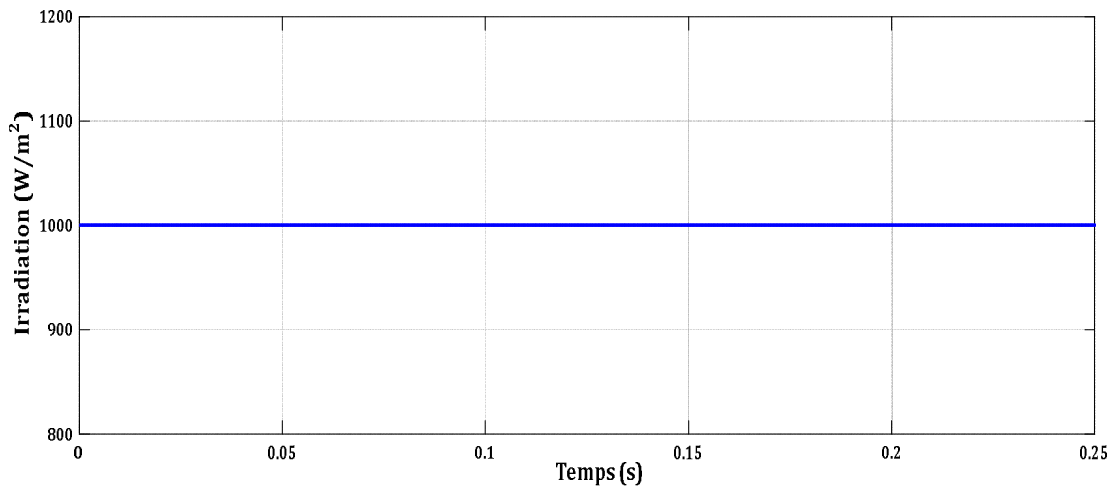


Figure II.13 : Irradiation de PV

La puissance générée de champ photovoltaïque PV est de l'ordre de 10kW, avec un ensoleillement de $1000\text{W} / \text{m}^2$ (voir figure II.14).

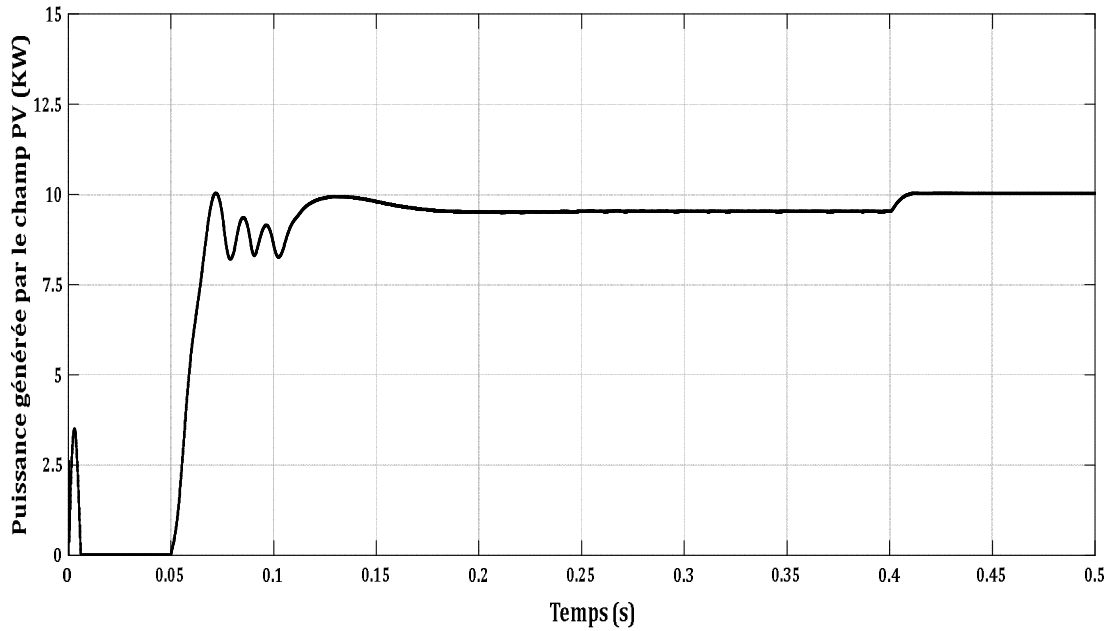


Figure II.14 : Puissance générée par le champ PV

Nous notons à travers les figures II.15 et II.16 la tension et le courant du groupe électrogène au site de télécommunications avec une valeur de la tension alternative 220 V et le courant avec une valeur 4 A.

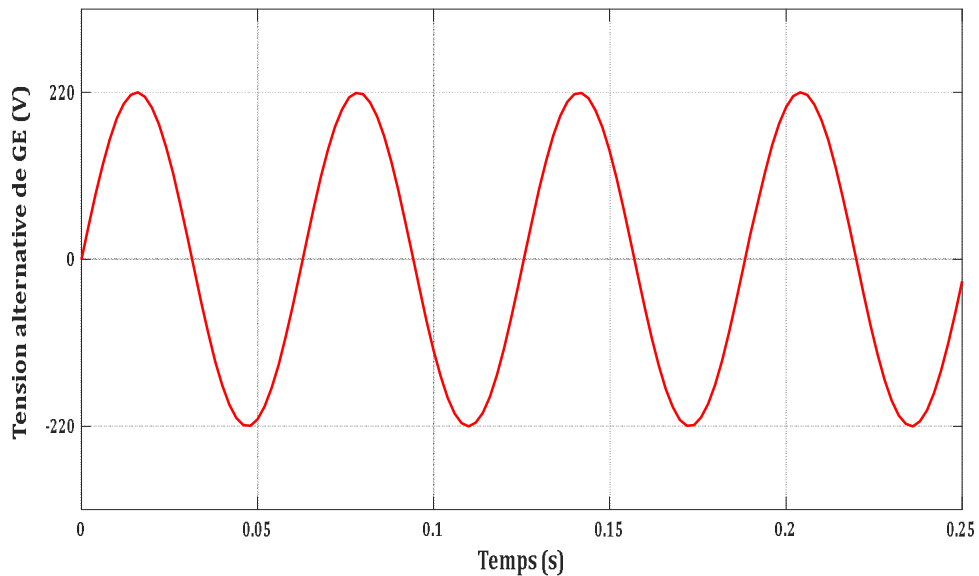


Figure II.15 : Tension de groupe électrogène

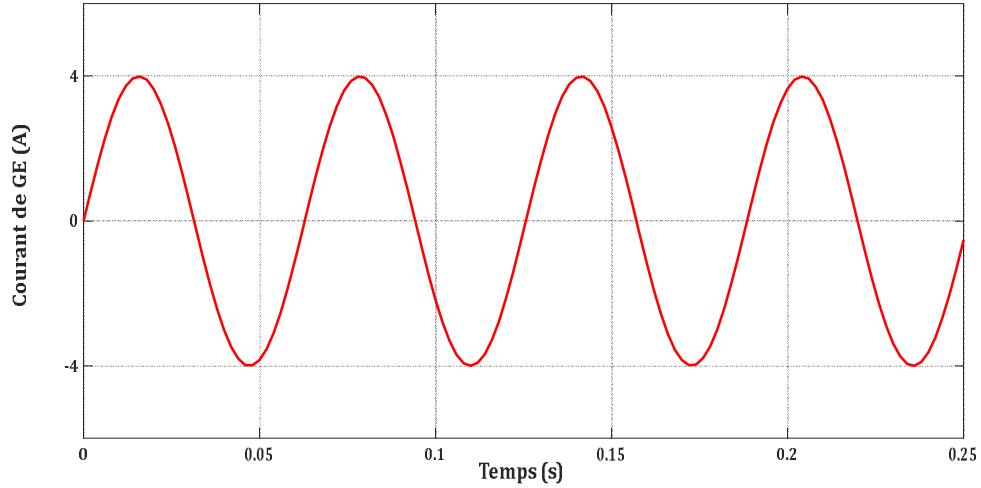


Figure II.16 : Courant de groupe électrogène

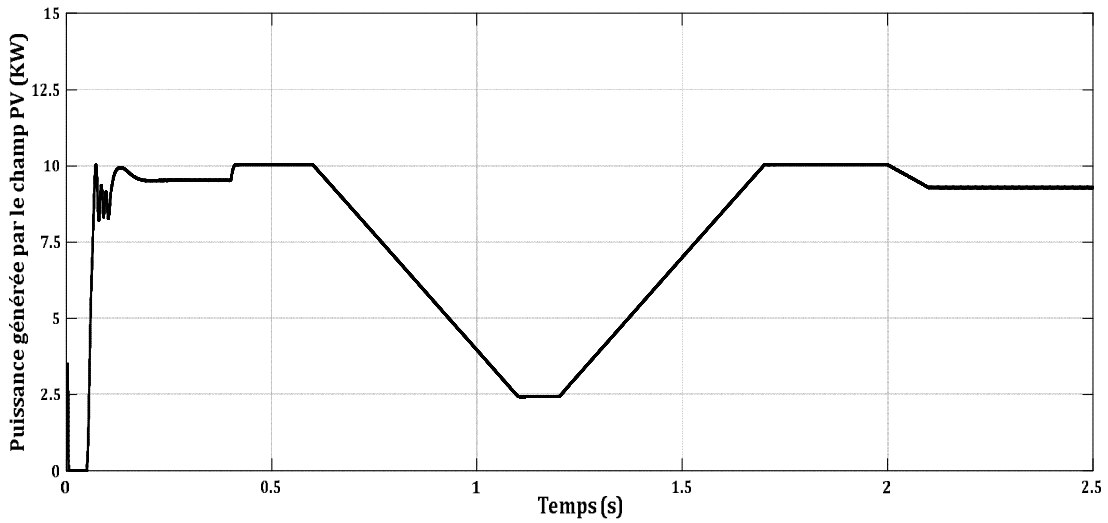


Figure II.17 : Puissance générée par le champ PV

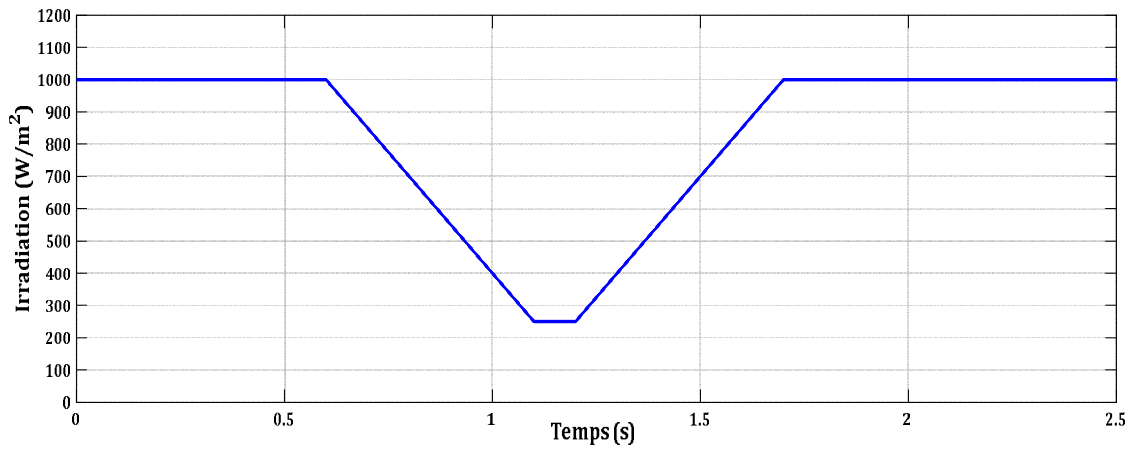


Figure II.18 : Irradiation de PV

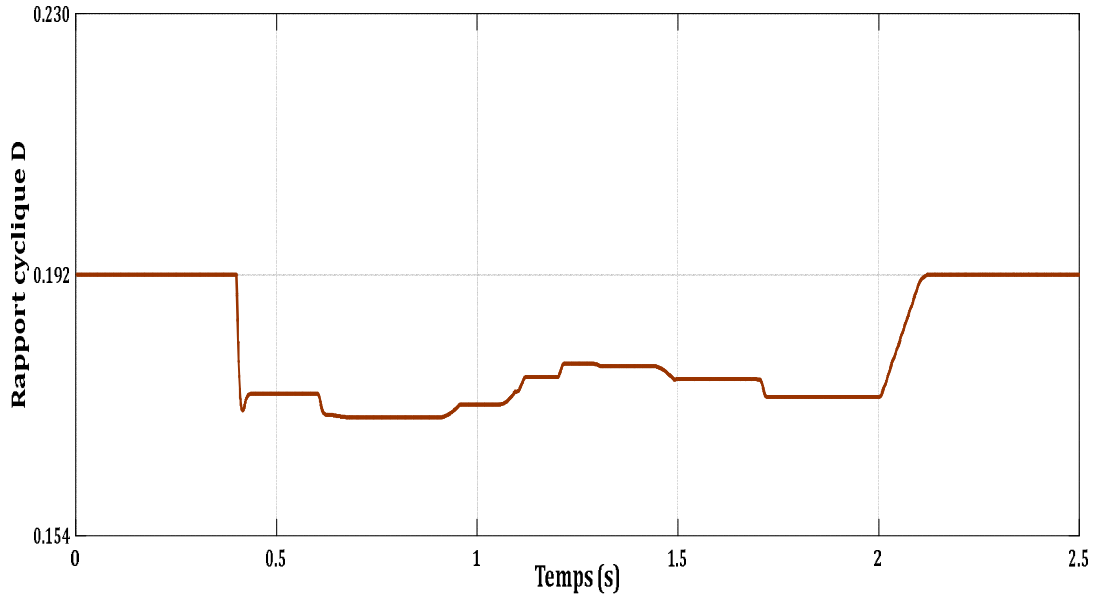


Figure II.19 : Rapport cyclique de PV

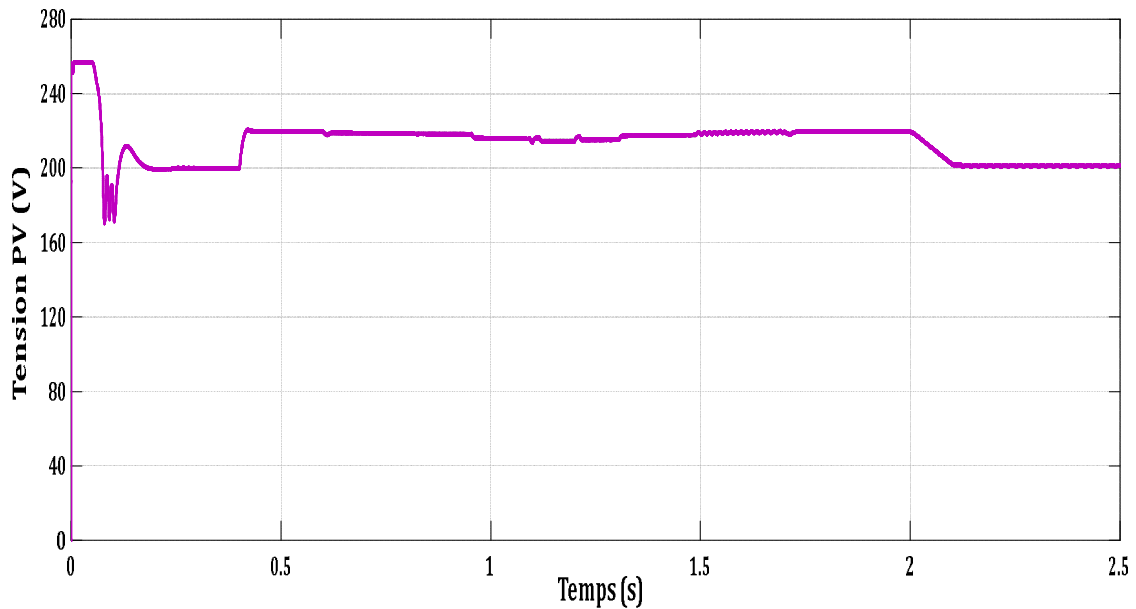


Figure II.20 : Tension générée par le champ PV

De l'instant $t = 0,7 \text{ s}$ à $t = 1,2 \text{ s}$, l'ensoleillement diminue en rampe vers le bas à partir de 1000 W / m^2 à 250 W / m^2 (figure II.18). Les commandes MPPT continuent le suivi de la puissance maximale délivrée par le champ photovoltaïque. A l'instant $t = 1.2 \text{ s}$, et quand l'ensoleillement atteint la valeur de 250 W / m^2 , le rapport cyclique D est de l'ordre de 0,177 (voir figure II.19). La tension et la puissance correspondantes sont de l'ordre de 220 V (voir figure II.20) et 2,5 KW (voir figure II.17) respectivement.

Notons que le suivi de la puissance maximale par les commandes MPPT est assuré même lors de ce changement rapide d'ensoleillement. A partir de l'instant $t = 1,5$ s à $t = 2,5$ s divers changements d'ensoleillement I_r est appliqué afin d'illustrer la bonne performance du contrôleur MPPT.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque que le convertisseur DC-AC et le convertisseur AC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles d'atteindre la puissance maximale des générateurs PV.

Le hacheur abaisseur peut diminuer la tension de sortie à 48V si le rapport cyclique de champ est de l'ordre de 0.192. La commande MLI a pour but d'obtenir l'allure sinusoïdale au niveau de la sortie de l'onduleur.

II.8.1.2 Courbe de charge du site de télécommunications

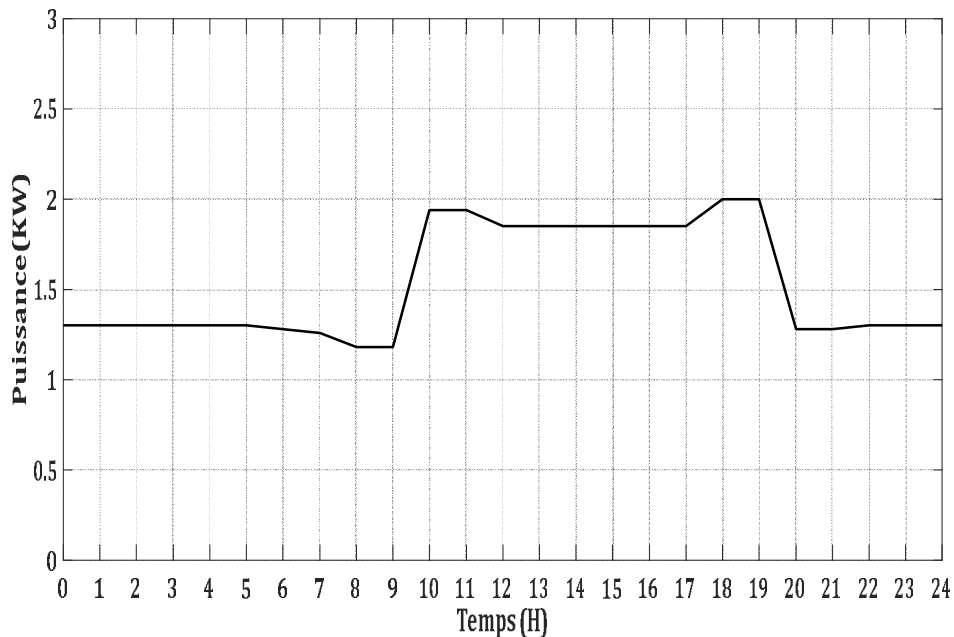


Figure II.21 : Graphique de la consommation journalière du site de télécommunications

La caractéristique de charge du site représente la variation de l'énergie utilisée dans le temps. Sur la figure II.21, le graphique de la courbe de charge contient trois intervalles le premier entre minuit à 9h00 la charge varie entre 1.18 KW et 1.30 kW, deuxième entre 09h00 et 20h00 varie entre 1.85 KW et 2 kW, et enfin entre 20h00 à 00h00, la consommation varie entre 1.28 KW et 1.3 kW.

II.8.1.3 Profil d'ensoleillement

Les valeurs d'ensoleillement typiques sur une période de vingt-quatre heures sont indiquées sur la figure II.22. A partir de 06h00, les valeurs d'ensoleillement commencent à augmenter, à midi la luminosité du soleil diminue en raison du passage d'un nuage de sorte que la production diminue jusqu'à 2.5 KW, puis elle diminue pour s'annuler à 18h00.

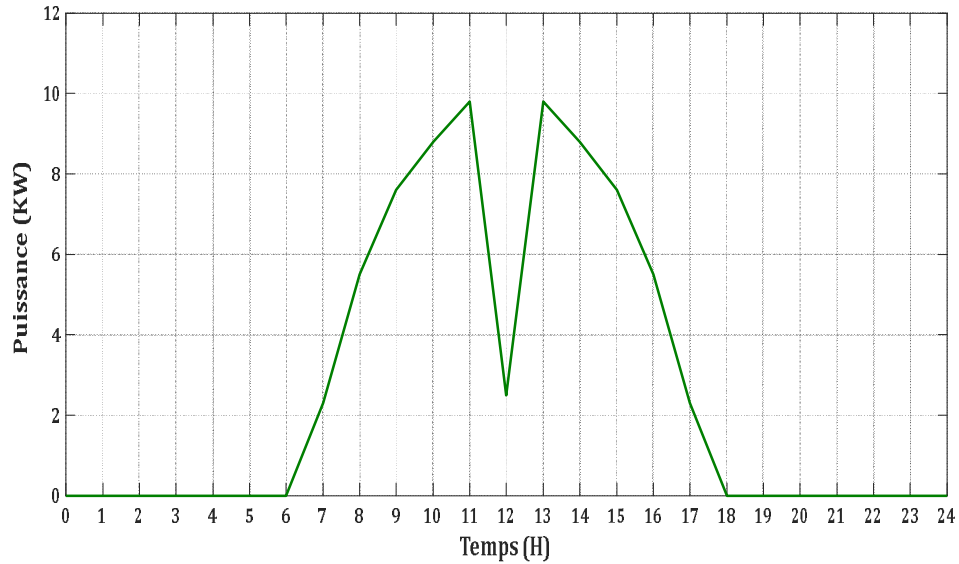


Figure II.22: Puissance produite par le champ photovoltaïque.

II.8.1.4 Courbe de puissance de la batterie

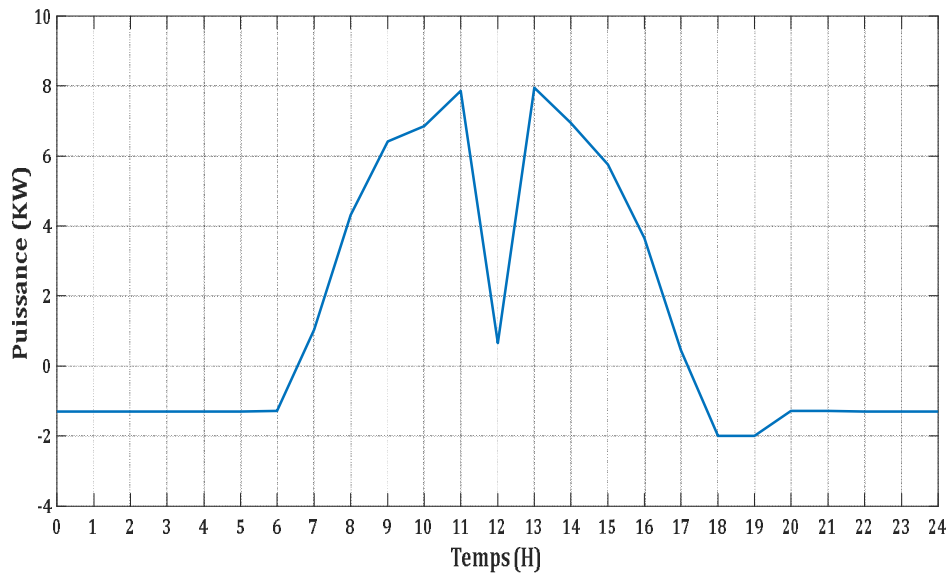


Figure II.23: Courbe de la puissance délivrée par les batteries

Les batteries sont une source complémentaire au champ PV, en fin d'alimentation de la charge ; nous avons noté l'allure de la puissance fournie par les batteries représentées sur la figure II.23. Le système de stockage se charge de 07h00 à 17h00, tandis que, de 17h00 à 00h00 il fournit de l'électricité pour combler le déficit énergétique. D'après la forme de la puissance délivrée par les batteries, représentée sur la figure II.23, il existe trois intervalles essentiels :

- De minuit à 7h00 du matin le rythme diminue, le système de stockage alimente la charge.
- De 07h00 à 17h00, les batteries se chargent, elles ne fournissent donc aucune énergie.
- A partir de 17h00 à minuit la batterie délivre sa puissance à la charge pour assurer le déficit énergétique dans le système.
- A midi, les batteries se rechargent avec très peu d'énergie du fait du passage d'un nuage à ce moment.

II.8.1.5 Courbes de puissance (Champ PV, Batteries, Charge)

Afin d'analyser les puissances fournies, soit par le champ PV ou les batteries d'une part et la puissance consommée par la charge d'autre part, les schémas des puissances, du champ PV, de la charge et du système de stockage, ont été enregistrés sur le même graphique dans la figure suivante.

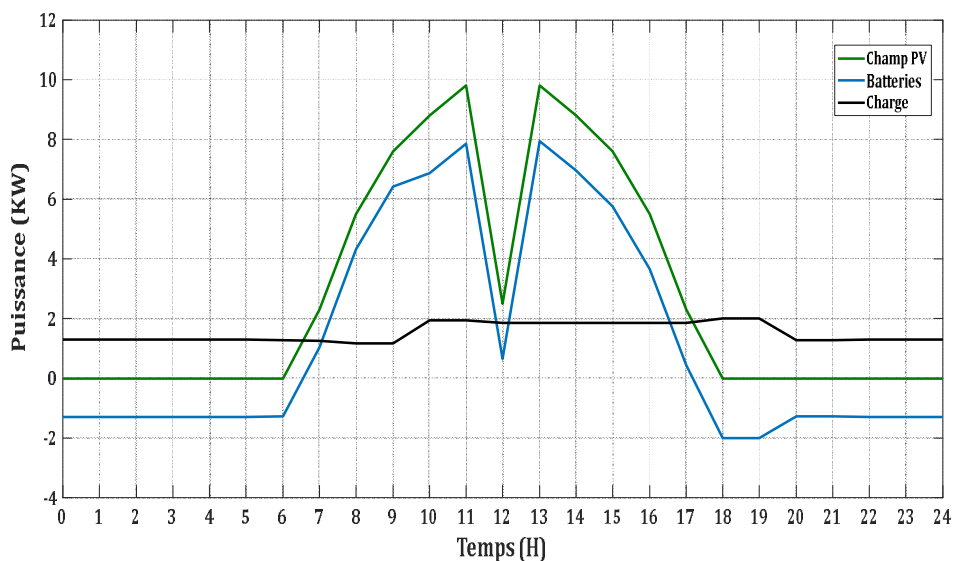


Figure II.24: Courbe de puissance (Champ PV, Batteries, Charge)

De minuit à 06h00, les batteries alimentent exclusivement la charge. De 6h00 à 7h00, la charge est alimentée par le générateur photovoltaïque et le système de stockage. De 7h00 à 17h00 le champ produit suffisamment d'énergie pour alimenter la charge et un surplus fourni aux accumulateurs ou à la charge dissipative. A partir de 17h00 à 18h00, le générateur photovoltaïque et le système de stockage alimentent la charge. L'absence d'irradiation suffisante, la puissance produite par le champ est nulle, le système de stockage fournit de l'énergie à la charge, cet intervalle est caractérisé par le pic de consommation Il convient de signaler que dans un système hybride, le champ photovoltaïque injecte de l'énergie directement dans le site de télécommunications, et stocke le surplus dans des batteries pour une utilisation ultérieure. Dans le cas où le système PV et le système de stockage ne fournissent pas assez d'énergie, le générateur diesel fournira l'énergie nécessaire pour le bon fonctionnement du site.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions de base sur le rayonnement solaire, et les différents types des systèmes hybrides et ensuite la modélisation de la consommation électrique des stations de télécommunications. Aussi, nous avons présenté la modélisation d'un système hybride PV/Diesel . La simulation d'un système hybride qui alimente un site de télécommunications est également présenté dans ce chapitre afin de démontrer l'efficacité d'un tel système en cas d'intermittence de la production photovoltaïque. Dans ce cadre plusieurs scénarios ont été testés. Le chapitre suivant sera consacré à l'optimisation d'un système hybride alimentant un site de télécommunications.

Chapitre III

Optimisation d'un système hybride alimentant un site de télécommunications

III.1 Introduction

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables, offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

La nature intermittente des énergies renouvelables entraîne des pannes de courant en raison d'une énergie insuffisante. Par conséquent, le générateur diesel est également considéré pour sa production continue d'électricité. Pour assurer le fonctionnement fiable du système, un dispositif de stockage peut être incorporé pour répondre aux demandes de charge. Les chercheurs ont prouvé que le système hybride est une source d'électricité fiable pour laquelle le soutien public augmente de jour en jour dans le monde.

Nous visons dans ce chapitre à optimiser un système de production hybride destiné à alimenter un site de télécommunications isolé donné en Algérie.

Une analyse comparative entre les résultats obtenus avec plusieurs configurations possibles, permet de conclure sur la solution la plus rentable .de points de vue technique, économique et environnemental.

Plusieurs logiciels ont été développés par différentes institutions pour le dimensionnement et l'analyse des systèmes d'énergies hybrides, par exemple, Hoga, Homer, Hybrid2, PV systs, etc.

Parmi tous ces logiciels, nous avons opté pour HOMER qui est l'outil largement utilisé pour l'optimisation des systèmes d'énergies hybrides. Il effectue la tâche d'optimisation complexe avec précision en faisant une simulation horaire du flux d'énergie entre la charge et les autres composantes du système, sur une durée d'une année [24-25].

III.2 Présentation du logiciel HOMER

Ce logiciel permet de faire des simulations pour ensuite optimiser les systèmes et pour finalement terminer avec des analyses de sensibilité sur ces systèmes optimisés. La solution obtenue par HOMER est la solution la moins coûteuse parmi différentes combinaisons de systèmes d'énergies renouvelables, d'énergies fossiles ou de systèmes

hybrides comprenant deux sources d'énergie ou plus. La Figure III.1 représente le modèle conceptuel du logiciel HOMER.

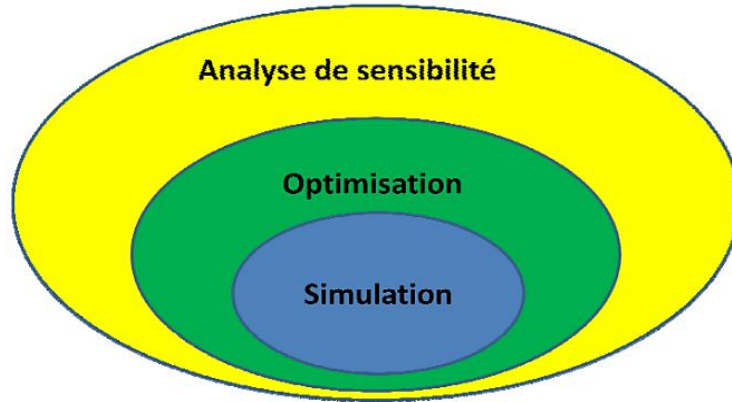


Figure III.1 : Modèle conceptuel du logiciel HOMER

Le logiciel permet de faire la simulation d'un système selon des données de gisement (solaire, éolien, diesel, etc.) en fonction d'une demande énergétique (besoins en énergie). Par la suite, il est possible d'analyser plusieurs configurations différentes pour ce même système afin d'en obtenir un système optimisé au niveau du coût. Le logiciel simule toutes les configurations demandées et donne la meilleure solution, la solution la moins chère, parmi celles-ci. Ensuite, il est finalement possible de faire des analyses de sensibilité afin de savoir si la solution trouvée reste la meilleure même s'il y a certains changements dans les différents paramètres entrés (variation du coût de la technologie, variation dans les données de gisement, etc.). Il est donc possible de faire un bon nombre d'analyses avec de nombreuses configurations différentes en moins de quelques minutes de simulation [26].

III.3 Optimisation et terminologie

La viabilité du système hybride conçu peut être examinée en distinguant les paramètres financiers, par exemple, le coût actualisé de la vitalité, le coût actuel net du système, les dépenses en capital du système et le coût de récupération. La simulation par HOMER rend le résultat optimal en fonction de ces paramètres économiques.

Dans cette perspective, nous avons consacré cette partie de notre travail à la recherche et l'évaluation des solutions les plus retables de points de vue technique, économique et écologique pour l'alimentation d'un site de télécommunications BTS isolé par rapport au réseau électrique, et qui est alimenté à l'origine par un groupe

électrogène diesel. L'étude compare les différentes configurations du système hybride en utilisant des indices tels que le coût actuel net total (CAN), le coût nivelé de l'énergie (CNE), la fraction renouvelable (FR) et finalement, les économies d'émissions. Cela permettra de mieux comprendre les exigences de configuration opérationnelle, de l'impact environnemental ainsi que les coûts d'exigences.

III.3.1 Coût actuel net (CAN)

Le CAN est défini par le calcul de toutes les dépenses supportées par le programme sur la durée de vie du système, moins la valeur des revenus gagnés pendant la durée de vie de l'entreprise. Coût actuel net comprenant le coût d'investissement initial, le coût de remplacement, les dépenses d'exploitation et de maintenance, le coût du carburant, etc. Le CAN est exprimé mathématiquement par l'équation (IV.1) :

$$\text{Coût actuel net} = \frac{C_{\text{annuel.tot}}}{FRC(t, D_{\text{projet}})} \quad (\text{III.1})$$

Où,

$C_{\text{annuel.tot}}$: est le coût annuel absolu

FRC : est un facteur de récupération du capital

t : est le taux d'intérêt

D_{projet} : est conçu pour la durée de vie du projet

III.3.2 Coût nivelé de l'énergie (CNE)

Le coût actualisé de l'énergie est la quantité d'énergie utile générée par le système. Le CNE est égale à la proportion de la dépense annuelle complète de puissance créée à la puissance totale utile générée par le système CNE.

$$\text{Coût nivelé de l'énergie (CNE)} = \frac{C_{\text{annuel.tot}}}{(E_{\text{ventes de grille}} + E_{\text{principale CA}} + E_{\text{principale CC}})} \quad (\text{III.2})$$

Où,

$C_{\text{annuel.tot}}$: est le coût annuel absolu

$E_{\text{principale CA}}$: est la charge CA principale desservie

$E_{\text{principale CC}}$: est la charge CC principale desservie

$E_{\text{ventes de grille}}$: Ventes de grille absolues

III.3.3 Fraction renouvelable (FR)

Énergie renouvelable totale produite par les sources d'énergie durable par rapport à la puissance totale produite par l'ensemble du système est connue sous le nom de fraction renouvelable [26-27]. Pour notre étude, la FR doit être aussi élevée que possible pour diminuer l'impact des émissions de gaz à effet de serre produites par le générateur diesel traditionnel, même s'il aura un impact sur la CAN en raison du coût des sources d'énergie renouvelables. Cela peut être mathématiquement exprimé sous cette forme :

$$\text{Fraction renouvelable (\%)} = 1 - \frac{\sum P_{diesel}}{\sum P_{renouvelable}} \quad (\text{III.3})$$

Où,

P_{diesel} : Puissance fournie par le générateur diesel

$P_{renouvelable}$: Production de sources renouvelables

III.4 Présentation du site de télécommunications étudié

Notre site de télécommunications est une station BTS, propriété de l'un des opérateurs algériens de réseaux de téléphonie mobile, située en bordure de la route nationale n°6 dans une zone isolée d'une ville du sud algérien appelée Béchar avec une latitude de 30° 35' N, et une longitude de 2° 39' O. Le site de télécommunications est à 150 km de la ville de Béchar, dans une zone isolée du réseau électrique.

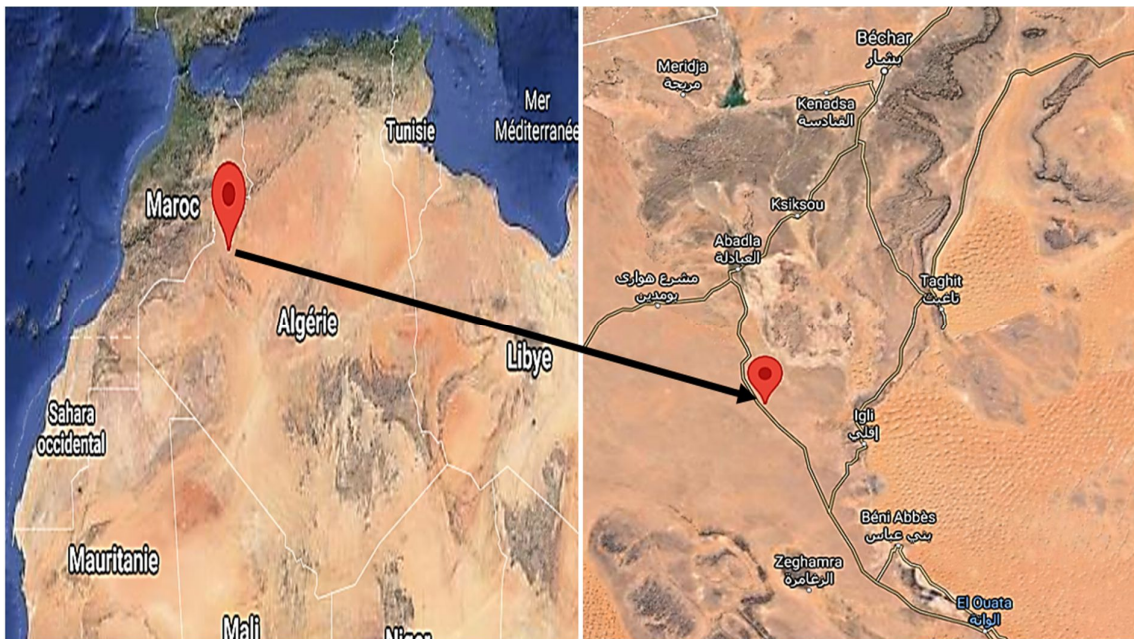


Figure III.2 : Situation géographique du site de Télécommunications étudié [28]

III.5 Méthodologie du travail

La démarche générale que nous avons utilisée pour le dimensionnement et les simulations des différents scénarios, est résumée comme suit :

1. Évaluation de la demande énergétique (le profil de charge);
2. Configuration du système d'alimentation (architecture du système);
3. Identifier les équipements nécessaires au système (panneaux solaires, convertisseur, batteries) dans le logiciel HOMER;
4. Déclaration des données nécessaires;
 - a. de gisement solaire pour le lieu désiré;
 - b. pour les équipements (prix des équipements et coût d'opération et d'entretien);
5. Lancement du calcul;
6. Optimisation des résultats obtenus de façon itérative pour arriver à la solution optimale;
7. Faire des analyses de sensibilité, si nécessaire;
8. Valider le système optimisé.

Les différentes étapes et démarches de nos simulations par le logiciel HOMER sont montrées dans l'organigramme suivant.

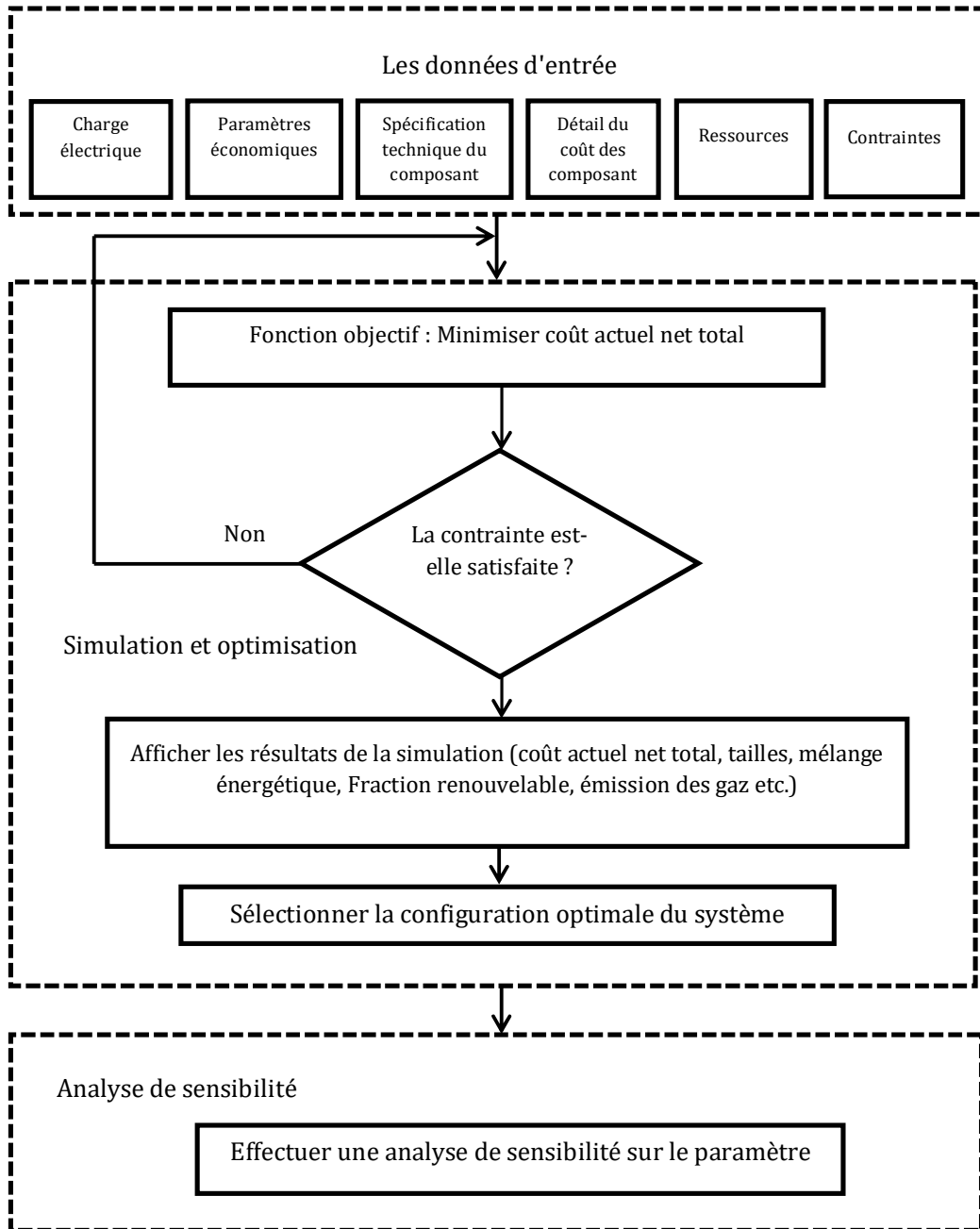


Figure III.3 : Les étapes utilisées dans logiciel HOMER [29]

III.5.1 Détails de l'énergie radiative du soleil pour le site étudié

La figure III.4 montre la courbe du rayonnement solaire pour notre zone d'étude, établie à partir des données du tableau III.1. On constate que le rayonnement varie entre 3.200 KWh/m²/jour pour le mois de décembre et 7.450 KWh/m²/jour pour le mois de juin avec une moyenne annuelle de 5.52063 KWh/m²/jour.

L'indice de luminosité mensuel est défini comme le rapport entre le rayonnement terrestre et le rayonnement extraterrestre. Les valeurs de ces derniers varient selon le lieu et la saison. Sur le tableau III.1, on observe que l'indice de clarté mensuel varie entre 0,590 en décembre et 0,672 en avril et que l'indice de clarté annuel est égal à 0,635.

Tableau III.1 : Données de rayonnement solaire pour la zone d'étude

Mois	Clarté	Rayonnement quotidien KWh/m ² /jour
Janvier	0.608	3.540
Février	0.641	4.530
Mars	0.656	5.710
Avril	0.672	6.850
Mai	0.662	7.360
Juin	0.652	7.450
Juillet	0.648	7.280
Août	0.615	6.450
Septembre	0.612	5.620
Octobre	0.604	4.550
Novembre	0.601	3.660
Décembre	0.590	3.200
Moyenne	0.635	5.521

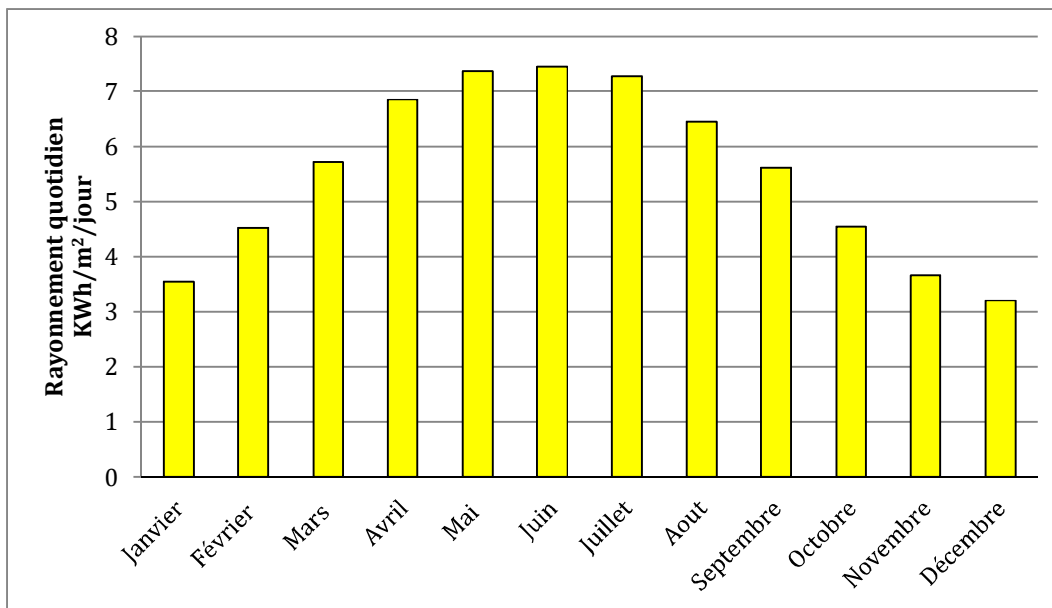


Figure III.4 : Courbe de rayonnement solaire pour le site étudié

III.5.2 Profil de charge du site

Typiquement, une charge conventionnelle d'un site de télécommunications se compose d'une charge d'équipement BTS (équipements radio-fréquence et traitement de signal) ainsi que, des charges de climatisation et d'éclairage. La consommation électrique maximale du climatiseur est considérée comme 1,8 kW, tandis que les équipements de la BTS et éclairage sont respectivement de 1500 W et 480 W.

Normalement, la pleine charge sera la somme des différentes charges susmentionnées. Cependant, lorsque la température baisse, le climatiseur peut être configuré pour s'éteindre automatiquement, minimisant ainsi la consommation d'énergie électrique.

Bien que les données du profil de charge horaire mesurées pour le site considéré ne sont pas disponibles, il est toutefois important de noter que la valeur nominale indiquée de l'équipement BTS ne sera pas chargée à pleine capacité à tout moment en raison de la variabilité de l'heure de fonctionnement de l'équipement qui dépend souvent du niveau d'utilisation par les abonnés mobiles. Cette charge est donc classée en trois catégories selon le niveau d'utilisation, à savoir :

- charge d'heure basse,
- charge d'heure moyenne,
- et charge d'heure chargée.

Sur la base de la première catégorie, il est supposé que l'abonné n'utilise que 10% de la charge totale des BTS, cela se produisait généralement de minuit à 6 h 00 de matin, alors que pour la deuxième catégorie, la consommation est considérée de l'ordre de 30 %, et cela se produit entre 7 h 00 et 10 h 00 du matin, et entre 18h et 23h du soir. Finalement, la troisième catégorie prend comme 50% et généralement survient pendant les heures ouvrables de la journée (10 h à 18h). Il convient également de noter que la climatisation ne fonctionne qu'en cas de besoin (température de site > 24°), tandis que l'éclairage ne sera exploité qu'en les heures de nuit et aussi en cas de besoin.

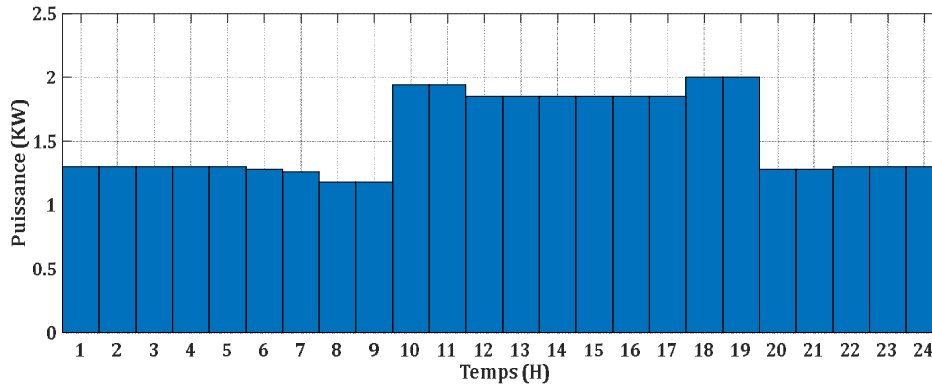


Figure III.5 : Profil de charge du site étudié

Sur la base de cette variation, le profil de charge horaire du site pour une journée type (1^{er} Janvier) est illustré par la figure III.5 d'où la moyenne de consommation d'énergie par jour, le pic journalier de la demande, et la demande moyenne quotidienne sont environ 37 kWh, 3,3 kW et 1,53 kW, respectivement.

L'inadéquation entre la valeur de crête (pic) et la valeur utilisée dans la figure III.5 est due au processus de mise à l'échelle et à l'aspect variabilité introduit dans HOMER pour rendre le modèle de charge unique.

En plus, le profil annuel de charge pour le site BTS considéré est illustré à la figure III.6. A partir de cette figure, on constate que le maximum la charge varie entre 2,8 kW et 3,6 kW par mois avec le plus bas en mai et le plus haut en août et le pic quotidien varie de 2,4 kW à 2,7 kW, alors que la moyenne la charge est presque la même dans tous les mois. Toute cette variation est due à la variabilité aléatoire mentionnée ci-dessus, facteur introduit dans HOMER pour tenir compte de la variation qui peut se produire dans la charge chaque jour de l'année [30-31].

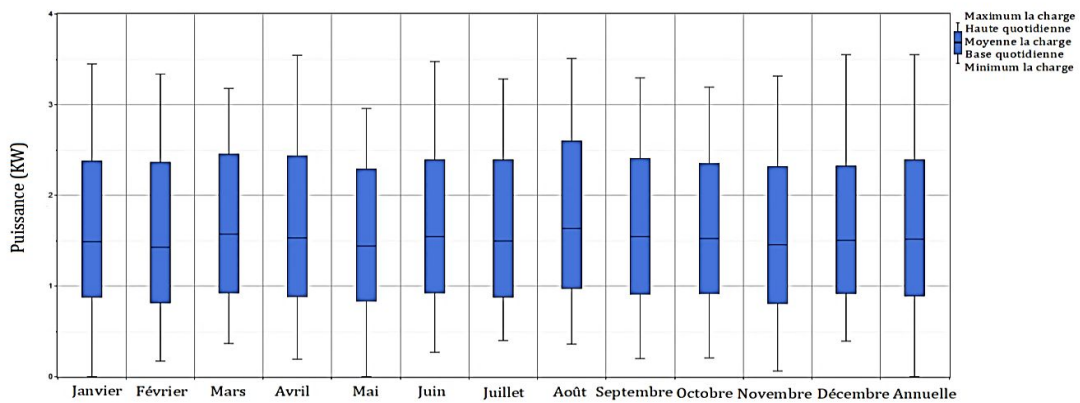


Figure III.6 : Profil annuel de charge du site

III.6 Configurations suggérées pour alimenter un site de télécommunications isolé

Dans ce chapitre, nous allons étudier quatre configurations possibles pour alimenter un site de télécommunications situé dans une zone isolée du désert algérien. Le but étant de comparer ces différentes configurations et de voir laquelle parmi ces derniers est la meilleure d'un point de vue technique, économique, et environnemental. Nous commençons tout d'abord par la première configuration qui consiste à la configuration d'origine du site étudié.

III.6.1 Configuration de base d'un site de télécommunications isolé

Le site dispose de deux générateurs diesel fonctionnant en alternance afin d'assurer une utilisation efficace et de prolonger la durée de vie des deux groupes.

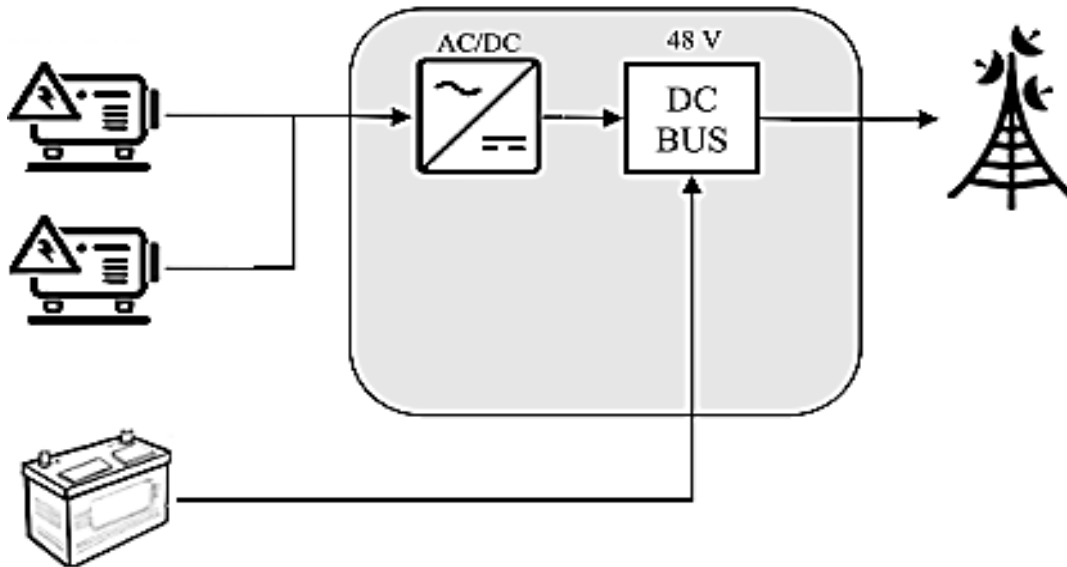


Figure III.7 : Configuration principale du système d'alimentation d'un site de télécommunications isolé

III.6.1.1 Détails des groupes électrogènes

Les caractéristiques du générateur sont présentées dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Données techniques et économiques du générateur Diesel

Quantité	Prix d'achat (\$)	Opération de maintenance (\$/h)
1	3400	0.047
2	6800	0.094

La puissance nominale de chaque groupe est égale à 13 kVA. Son coût à l'achat est égale à 3400 \$ (467141.98 DA), et ses coûts d'opération et de maintenance pour chaque 1KW généré, sont estimés à 0.047 \$ par heure (6.40 DA/h). Les coûts d'opération et de maintenance comprennent ceux de l'opérateur plus 5% de l'investissement par an. Ils ne comprennent pas ceux liés à la consommation de carburant [32-33].

III.6.1.2 Détails du combustible

Actuellement, le prix de diesel en Algérie est de 29,01 dinars algériens (DA/L), ce qui équivaut à 0,214 \$/L. En fait, le coût du carburant varie selon la région et selon l'utilisation (véhicule ou autre). Dans des endroits éloignés, le prix serait plus élevé en raison des coûts de transport. Une autre cause responsable de l'augmentation des prix du carburant est la pénurie de carburant dans des tels endroits. Pour notre cas d'un site isolé, le prix serait plus élevé en raison du coût du transport, et le prix final de diesel sera de l'ordre de 0,25 \$/L (34.01 DA/L). Les données de combustible sont présentées dans le tableau III.3

Tableau III.3 : Données techniques et économiques du combustible

Le prix du carburant (\$ / L)	Densité (kg/m ³)	Contient du carbone	Contient du soufre
0.250	820	88%	0.33%

III.6.1.3 Détails des batteries de stockage

Sachant la tension du système est de 48 volts et les batteries sont de 12 volts avec capacité 275 Ah. L'autonomie du système est assurée par une chaîne de 4 batteries, de type « UCG 275-12 ». Le coût des batteries à l'achat est 1800 \$ (245073.6 DA), et les coûts d'opération et de maintenance est 40 \$ (5446.08 DA). Les coûts d'opération et de maintenance correspondent à 1% de l'investissement par année sans compter le remplacement des batteries [34-35].

Tableau III.4 : Données techniques et économiques des batteries

Quantité	Prix d'achat (\$)	Opération de maintenance (\$/an)
4	1800	40

III.6.1.4 Détails du convertisseur

Les sites de télécommunications sont équipés à la fois par des éléments à courant continu et à courant alternatif ce qui impose la présence d'un convertisseur. Les données liées au convertisseur utilisé sont présentées dans le tableau III.5. La taille du

convertisseur est égale à 6 kW, son coût à l'achat est 2400 \$ (326764.8 DA), et ses coûts d'opération et de maintenance est 48 \$ (6535.32 DA). Les coûts d'opération et de maintenance sont estimés à 1% de l'investissement par an.

Tableau III.5 : Données techniques et économiques du convertisseur

Taille (KW)	Prix d'achat (\$)	Opération de maintenance (\$/an)
6	2400	48

III.6.1.5 Résultats de la première configuration

Une fois toutes les données introduites dans le logiciel HOMER, nous avons obtenu les résultats qui sont affichés dans le tableau III.6.

Tableau III.6 : Résultats obtenus du système (02 groupes électrogènes)

Paramètres	Groupe électrogène
Carburant (L)	21900
Durée de fonctionnement du GE par jour	en continu (7j/7j, 24H/24H)
Durée de vie prévue du GE	15 ans
CO ₂ (kg/an)	24907
CO (kg/an)	44.2
PM (kg/an)	3.33
NO _x (kg/an)	394
L'énergie totale produite (kWh/an)	15988
Le coût d'exploitation(CNE)(\$/an)	7404
Le coût de capital initial (\$)	11000
Le coût de l'électricité (\$/KWh)	0.396
Le coût de système total (CAN) (\$)	29429

Un coût total durant une année de fonctionnement d'une valeur de 29429 \$ (4037982.52 DA) et Le coût d'exploitation d'une valeur 7404 \$/an (1017820.48 DA/an), avec le coût de capital initial est 11000 \$ (1512159.00 DA). Le coût de l'électricité est 0.396 \$/KWh (54.43 DA/KWh), en utilisant 21900 L de carburant par an et la durée de fonctionnement du GE par jour est 24H/Jour, avec des émissions des gaz de l'ordre: CO₂ (24907 kg/an), CO (44.2 kg/an) et PM (3.33 kg/an), NO_x, (394 kg/an)

La figure III.8 montre les détails de la production annuelle d'électricité du système.

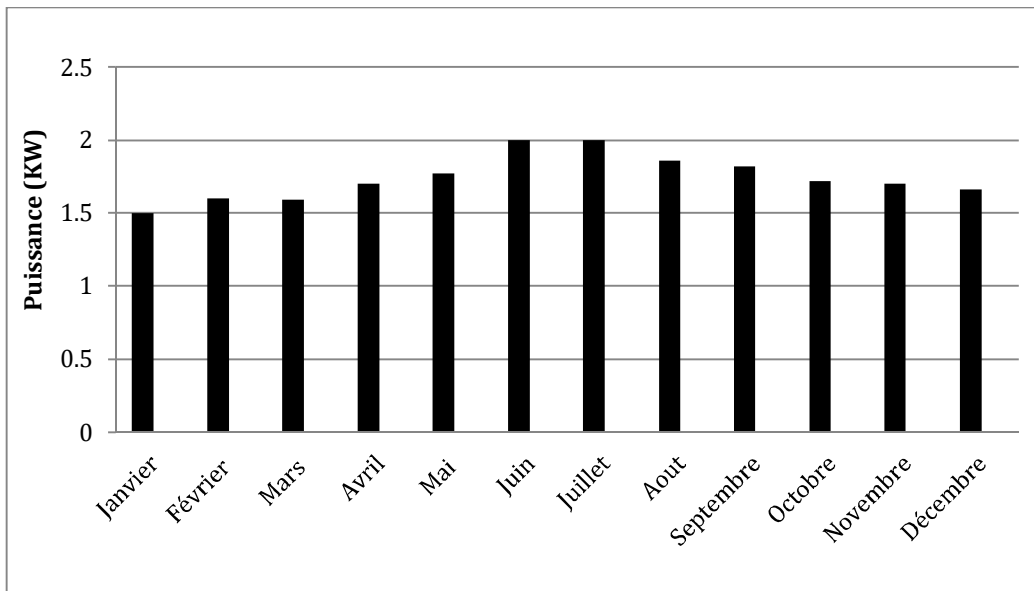


Figure III.8 : Statistiques sur la production annuelle d'électricité du système de la première configuration (02 groupes électrogènes)

L'énergie totale produite par notre système est égale à 15988 kWh/an

III.6.2 Deuxième Configuration (01 Groupe électrogène + réseau Sonelgaz)

Dans la deuxième configuration, le groupe électrogène avec le réseau Sonelgaz alimente le site de télécommunications sur une période de 24 heures. Nous allons connecter le site au réseau Sonelgaz et voir à quel point cette configuration est efficace. Pour cela, nous allons tester trois cas possibles en fonction de la qualité du réseau électrique à l'endroit de l'installation du site, à savoir :

- Réseau électrique sans coupure d'électricité
- Réseau électrique avec des coupures fréquentes
- Réseau électrique avec des coupures très fréquentes

Nous conserverons les mêmes éléments précédents mentionnés dans la première configuration en utilisant un seul groupe électrogène.

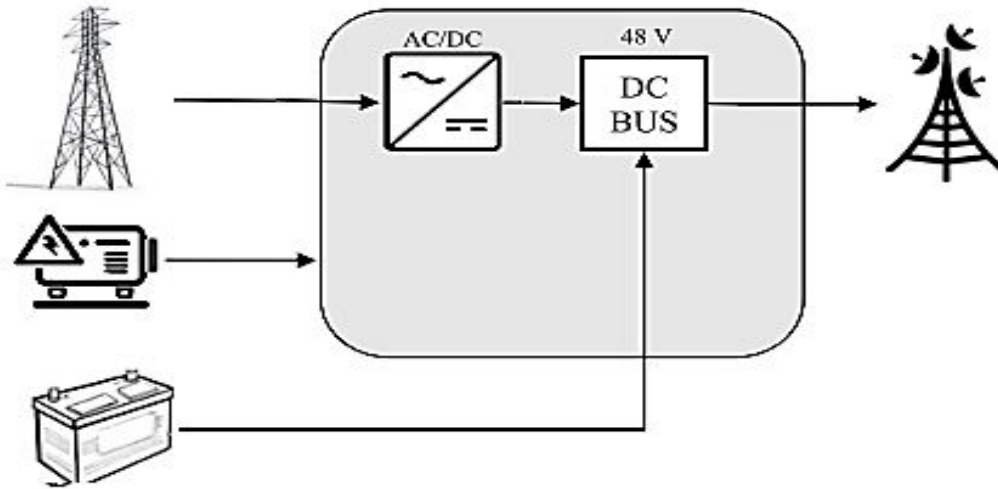


Figure III.9 : Configuration « Réseau + GE + Système de stockage» pour l'alimentation d'un site de télécommunications isolé

III.6.2.1 Détails du réseau électrique

Les données liées aux du réseau électrique sont présentés dans le tableau III.7.

Tableau III.7 : Données techniques et économiques du réseau électrique

Prix (\$/KWh)	Revendre (\$/KWh)
0.033	0.033

Le point de raccordement au réseau Sonelgaz le plus proche disponible est à plus de 50 km, il doit donc être relié au moins à moyenne tension ou haute tension, et cela représente un cout supplémentaire pour l'opérateur téléphonique. La mise en place d'un poste moyenne tension avec sa ligne de transport (pylônes et câbles) impose une contribution de l'ordre de 90 % de la part de l'investisseur, et le reste (10%) est assuré par la Sonelgaz. Cela dit que le coût total est pratiquement sur les épaules de l'investisseur. A titre d'information, un poste moyenne tension coûte plus de 14 551.28 \$ (2000000 DA) en plus du coût total du système.

III.6.2.2 Résultats de la deuxième configuration

Pour la deuxième configuration nous avons obtenu les résultats qui sont affichés dans les tableaux suivants.

III.6.2.2.1 Réseau électrique sans coupure d'électricité

Tableau III.8 : Résultats obtenus du réseau électrique sans coupure d'électricité

Paramètres	Réseau Sonelgaz + GE
Carburant (L)	0
Durée de fonctionnement du GE par jour	0
CO (kg/an)	9.877
NO _x (kg/an)	20.9
L'énergie totale produite (kWh/an)	15629
Le coût d'exploitation(\$/an)	8027
Le coût de capital initial (\$)	22151
Le coût de l'électricité (\$/KWh)	0.425
Le coût de système total (CAN) (\$)	34665

Un coût total durant une année de fonctionnement d'une valeur de 31265 \$ (4289901.92 DA) et un coût d'exploitation d'une valeur 8027 \$/an (1101392.70 DA/an), avec un coût de capital initial de l'ordre de 22151 \$ (3039360.86 DA). Le coût de l'électricité est de l'ordre de 0.425 \$/KWh (58.41 DA/KWh), avec des émissions des gaz de l'ordre: CO (9.877 kg/an), NO_x, (20.9 kg/an).

Dans ce cas de figure, nous admettons que le pourcentage d'interruption du réseau électrique de la région de notre site est trop faible. Cela dit que le système de stockage peut fournir l'énergie en cas d'interruption du réseau électrique, ce qui empêche l'intervention du groupe électrogène.

La figure III.10 montre les détails de la production annuelle d'électricité du système.

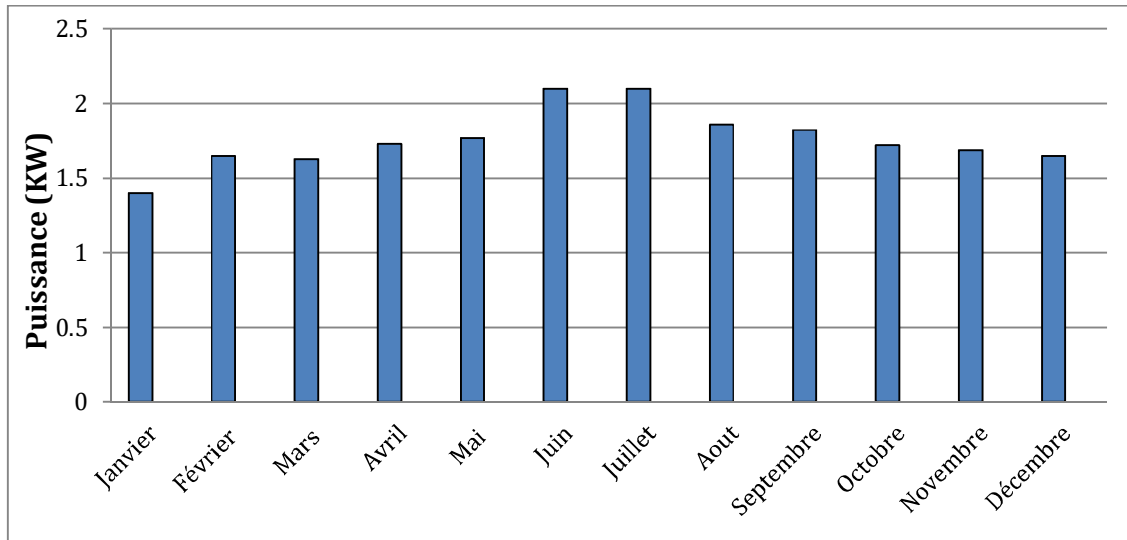


Figure III.10 : Statistiques de la production annuelle d'électricité du système par le réseau électrique (sans coupures)

L'énergie totale produite par notre système (réseau électrique) est égale à 15629 kWh/an.

III.6.2.2.2 Réseau électrique avec des coupures fréquentes

Tableau III.9 : Résultats obtenus du réseau électrique avec des coupures fréquentes

Paramètres	GE + réseau Sonelgaz
Carburant (L)	1916.25
Durée de fonctionnement du GE par jour	1.93H/24H
Durée de vie prévue du GE	30 ans
CO ₂ (kg/an)	10907
CO (kg/an)	23.3
PM (kg/an)	1.9
NO _x (kg/an)	145
L'énergie totale produite (kWh/an)	15629
Le coût d'exploitation (\$/an)	8192
Le coût de capital initial (\$)	22151
Le coût de l'électricité (\$/KWh)	0.511
Le coût de système total (CAN) (\$)	35730

Un coût total durant une année de fonctionnement d'une valeur de 35730 \$ (4902549.03 DA) et Le coût d'exploitation d'une valeur 8192 \$/an (1124032.51 DA/an), avec le coût de capital initial est 22151 \$ (3039360.86 DA). Le coût de l'électricité est 0.511 \$/KWh (70.11 DA/KWh), en utilisant 1323.125 L de carburant par an et la durée de fonctionnement du GE par jour est 1.93H/Jour, avec des émissions des gaz de l'ordre: CO₂ (10907 kg/an), CO (23.3 kg/an) et PM (1.9 kg/an), NO_x, (145 kg/an). Après une coupure fréquente de courant, le système de stockage contribue à alimenter le site de télécommunications en énergie électrique en fonction de la capacité stockée puis intervient groupe électrogène avec une durée 1.93H par jour. La figure III.11 montre les détails de la production annuelle d'électricité du système.

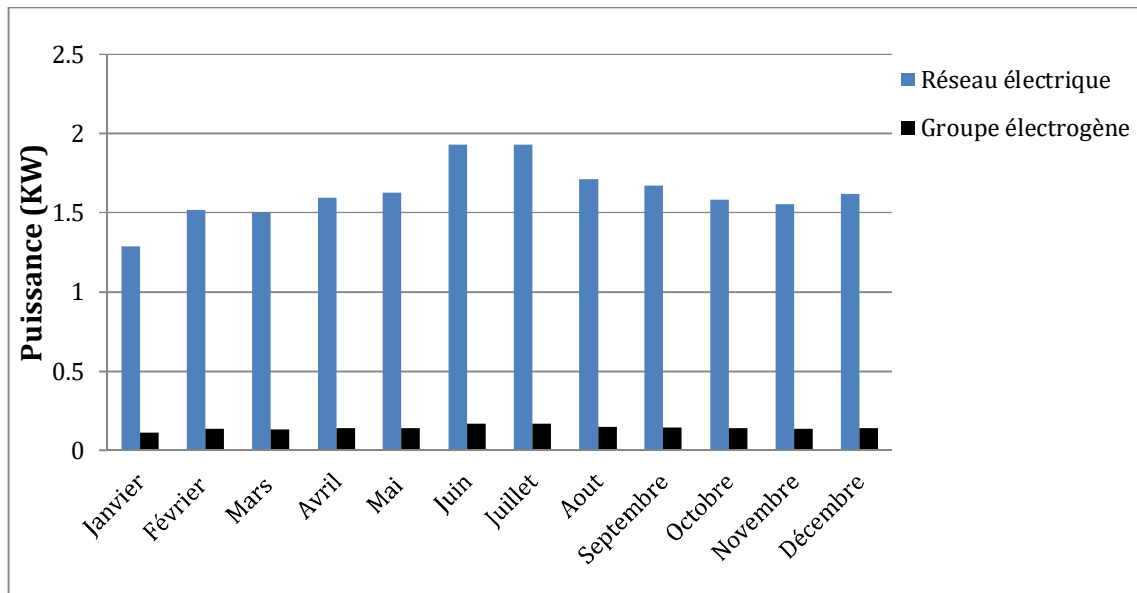


Figure III.11 : Statistiques de la production annuelle d'électricité du système par le réseau électrique et le groupe électrogène (cas de coupures fréquentes)

Une énergie produite totale de 15629 kWh/an à travers le réseau électrique (Sonelgaz) et le groupe électrogène.

III.6.2.2.3 Réseau électrique avec des coupures très fréquentes

Tableau III.10 : Résultats obtenus du réseau électrique avec des coupures très fréquentes

Paramètres	GE + réseau sonlegaz
Diesel (L)	4745
Durée de fonctionnement du GE par jour	5.03H/24H
Durée de vie prévue du GE	30 ans
CO ₂ (kg/an)	12125
CO (kg/an)	30.7
PM (kg/an)	2.5
NO _x (kg/an)	265
L'énergie totale produite (kWh/an)	15629
Le coût d'exploitation(\$/an)	8192
Le coût de capital initial (\$)	22151
Le coût de l'électricité (\$/KWh)	0.560
Le coût de système total (CAN) (\$)	36437

Un coût total durant une année de fonctionnement d'une valeur de 36437 \$ (4999557.21 DA) et Le coût d'exploitation d'une valeur 8192 \$/an (1124032.51 DA/an), avec le coût de capital initial est 22151 \$ (3039360.86 DA). Le coût de l'électricité est 0.560 \$/KWh (76.84 DA/KWh), en utilisant 4151.875 L de carburant par an et la durée de fonctionnement du GE par jour est 5.03H/Jour, avec des émissions des gaz de l'ordre: CO₂ (12125 kg/an), CO (30.7 kg/an) et PM (2.5 kg/an), NO_x, (265 kg/an). Après une coupure très fréquente de courant, le système de stockage contribue à alimenter le site de télécommunications en énergie électrique en fonction de la capacité stockée puis intervient groupe électrogène avec une durée 5.03H par jour.

La figure III.12 montre les détails de la production annuelle d'électricité du système.

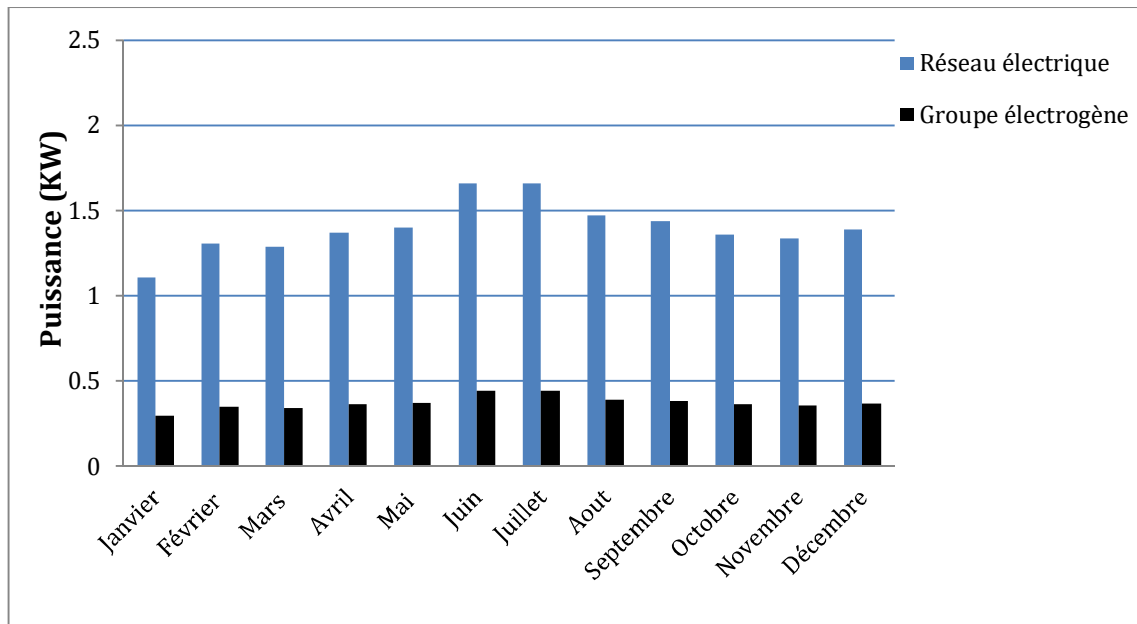


Figure III.12 : Statistiques de la production annuelle d'électricité du système par le réseau électrique et le groupe électrogène (cas de coupures très fréquentes)

Une énergie produite totale de 15629 kWh/an à travers le réseau électrique (sonelgaz) et le groupe électrogène.

III.6.3 Troisième Configuration (PV + groupe électrogène)

Dans la troisième configuration, nous avons simulé un système hybride composé de panneaux solaires, d'un groupe électrogène et de batteries. Afin d'augmenter l'autonomie du système, et pour absorber l'énergie produite par les panneaux PV, nous avons augmenté la capacité de stockage de notre système en utilisant trois strings.

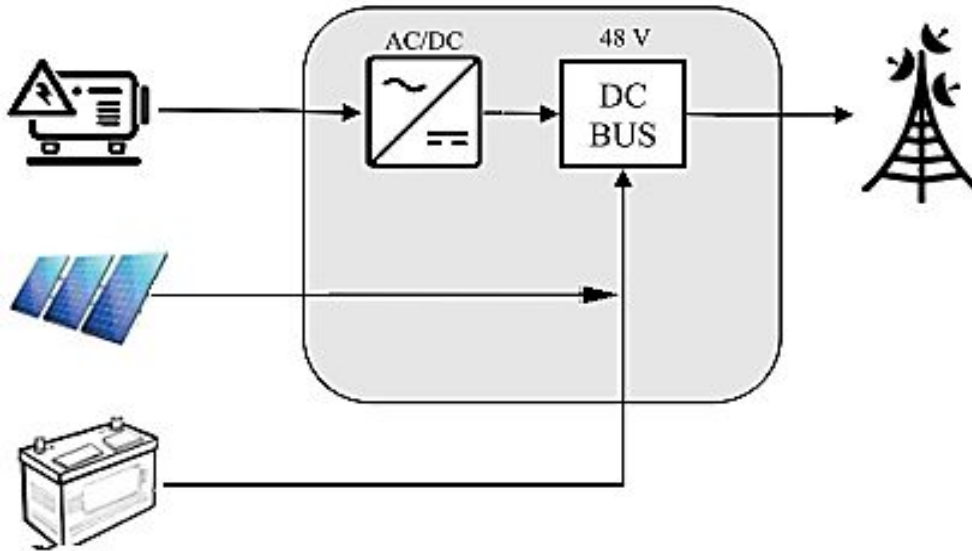


Figure III.13 : Configuration « PV + GE » pour l'alimentation d'un site de télécommunications isolé

III.6.3.1 Détails du champ de panneaux photovoltaïques

Nous avons utilisé des panneaux photovoltaïques de type « VSG 580 » du fabricant Ertex Solar. Chaque module à une puissance unitaire de 580 Wc. Le nombre des panneaux photovoltaïques obtenus est de 16 panneaux mis tous en parallèle. La tension délivrée par chaque module c'est 79,11V. Le coût du champ à l'achat équivaut à 1000 \$ (136138.70DA) et ses coûts d'opération et maintenance sont estimés à 10 \$ (1361.52 DA). Les coûts d'opération et maintenance comprennent le salaire d'un technicien ainsi que 1% de l'investissement par année.

Les propriétés du champ photovoltaïque sont présentées dans le tableau III.11 [36-37].

Tableau III.11 : Données techniques et économiques du générateur PV.

Paramètre	Les valeurs
la puissance du champ photovoltaïque (W)	9280
Prix d'achat d'une 1KW (\$)	1000
Opération de maintenance (\$/an)	10
Puissance maximale du panneau Pmpp (Wc)	580
Courant de court-circuit Isc (A)	7.81
Courant nominal Impp (A)	7.33
Tension de circuit ouvert Voc (V)	98.73
Tension nominale Vmpp (V)	79,11
Nombre des panneaux photovoltaïques	16 (en parallèle)

III.6.3.2 Données du contrôle et contraintes du système

Notre système hybride fonctionne suivant la stratégie du stockage à long terme « Cycle Charge Strategy ». C'est une stratégie de répartition selon laquelle chaque fois qu'un générateur doit desservir la charge primaire, il fonctionne à pleine puissance de sortie. L'excédent de production d'électricité va vers les objectifs moins prioritaires tels que, par ordre de priorité décroissante : desservir la charge différée, recharger le banc de stockage. Lors de l'utilisation de cette stratégie de charge cyclique, les sources d'alimentation contrôlables (générateurs, système de stockage) sont distribués à chaque étape de la simulation dans un processus en deux étapes. Dans un premier temps, nous sélectionnons la combinaison optimale de sources d'énergie pour desservir la charge primaire au moindre coût total, tout en satisfaisant l'exigence de réserve de fonctionnement. Ensuite, nous augmentons la sortie de chaque générateur dans cette combinaison optimale à sa capacité nominale, ou aussi près que possible sans provoquer un excès d'électricité. Lorsqu'un état de charge de consigne est appliqué à la stratégie de charge cyclique, l'état de charge du stockage est inférieur au point de consigne, et le stockage ne se déchargeait pas dans le pas de temps précédent, afin d'éviter de décharger le stockage dans ce pas de temps. Un générateur est probablement utilisé pour alimenter la charge primaire et produire un excès d'électricité pour charger le système de stockage. Ainsi, lorsque le système commence à charger les batteries, il continue de le faire jusqu'à ce qu'il atteigne l'état de charge du point de consigne. Les contraintes telles que le taux annuel de coupure de courant, et la part minimale en énergie renouvelable, sont les conditions que le système doit satisfaire. [38].

III.6.3.3 Démarrage des calculs

Pour la troisième configuration nous avons obtenu les résultats qui sont affichés dans le tableau suivant:

Tableau III.12 : Résultats obtenus du système (PV + GE)

Paramètres	PV + GE
Diesel (L)	931
Durée de fonctionnement du GE par jour	1.02H/24H
Durée de vie prévue du GE	30 ans
CO ₂ (kg/an)	674
CO (kg/an)	1.66
PM (kg/an)	0.125
NO _x (kg/an)	14.8
L'énergie totale produite (kWh/an)	18315
Le coût de capital initial (\$)	17200
Le coût d'exploitation(\$/an)	2977
Le coût de l'électricité (\$/KWh)	0.340
Le coût de système total (CAN) (\$)	24145

A travers cette configuration, nous avons obtenu un coût total de 24145 \$ (3312959.60 DA) pour une année de fonctionnement, et un coût d'exploitation d'une valeur 2977 \$/an (408477.15 DA/an), avec un coût de capital initial de l'ordre de 17200 \$ (2360029.20 DA). Le coût de l'électricité obtenu est de l'ordre de 0.340 \$/KWh (46.65 DA). La production autonome du GE nécessite 931L de carburant par an pour une durée de fonctionnement de 1.02H/jour. Pour ce cas de figure, nous avons enregistré les émissions suivantes des gaz: CO₂ (674 kg/an), CO (1.66 kg/an), PM (0.125 kg/an), et NO_x (14.8 kg/an). La figure III.14 montre les détails de la production annuelle d'électricité du système.

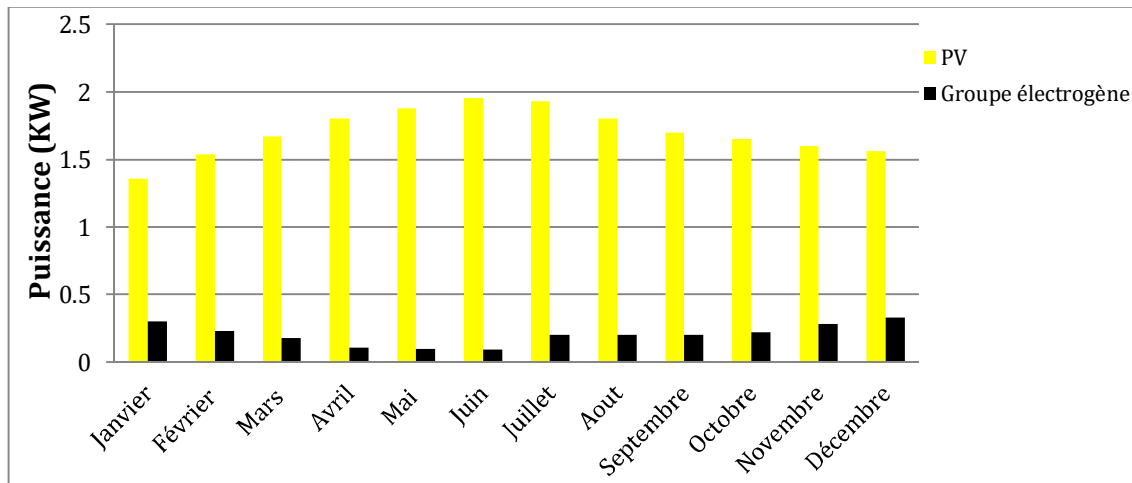


Figure III.14 : Statistiques sur la production annuelles d'électricité du système

L'énergie totale produite par le système hybride groupe électrogène/ PV est de 18315 kWh/an, avec une fraction d'énergie renouvelable (FR) de 95 %. On constate que les énergies mises en jeu dans notre système présentent un caractère continu marqué par la disponibilité durant toute l'année de l'énergie produite, étant donné que la charge non satisfaite et le déficit sont négligeables, ce qui est très satisfaisant pour les clients (charge satisfaite à 100%).

III.6.4 Comparaison entre les résultats des différentes configurations (1,2et 3)

Après avoir étudié chaque configuration séparément, nous allons chercher la meilleure configuration, en comparant le prix de kilowattheure et le coût d'exploitation et le coût de capital initial et la Consommation du carburant avec les émissions des gaz à effet de serre, La durée de fonctionnement du GE/Jour, enfin le coût de système total de chaque configuration.

Tableau III.13 : Comparaison entre les résultats des différentes configurations

Paramètres	GE + réseau électrique			GE	Hybride système PV/GE	
	Sans coupure	Coupures fréquentes	Coupures très fréquentes			
Le coût de l'électricité (\$/KWh)	0.425	0.511	0.560	0.396	0.340	
Le coût d'exploitation(CNE)(\$/an)	8027	8192	8192	7404	2977	
Le coût de capital initial (\$)	22151	22151	22151	11000	16600	
L'énergie totale produite (kWh/an)	15629	15629	15629	15988	18315	
Le coût de système total (CAN)(\$)	34665	35730	36437	29429	24145	
La consommation du carburant(L)	0	1916.25	4745	21900	931	
Les émissions des gaz à effet de serre	CO (kg/an)	9.877	23.3	30.7	44.2	1.66
	CO ₂ (kg/an)	0	10907	12125	24907	674
	PM (kg/an)	0	1.9	2.5	3.33	0.125
	NO _x (kg/an)	20.9	145	265	394	14.8
Durée de fonctionnement du GE/J	0	1.93H/J	5.03H/J	24H/J	1.02H/J	

Lorsqu'on voit les résultats obtenus, il devient clair que la configuration appropriée c'est la troisième, qui consiste à un système hybride (PV/GE). La comparaison est basée sur:

- le coût du projet,
- le prix des kilowattheures et des frais d'exploitation,

- la consommation du carburant,
- et finalement, les émissions des gaz à effet de serre,

La configuration (GE et le réseau électrique) arrive en deuxième position. Cependant, il s'agit de la dernière configuration classée en termes de coût total du système et de prix du KWh. Nous avons testé trois cas possibles en fonction de la qualité du réseau électrique et nous l'avons classé comme suit:

1. le plus rentable, de points de vue économique et environnemental est logiquement le réseau électrique sans coupure,
2. puis, le réseau électrique avec des interruptions fréquentes,
3. et enfin, le réseau électrique avec des interruptions très fréquentes.

Les résultats du tableau III.13 indiquent que le coût le plus faible du KWh est généré par le système hybride (PV/générateur diesel avec des batteries) .il est de l'ordre de 0.340 \$/ (47.31 DA/KWh). Cela nous permet de conclure donc que le système hybride est le plus économiquement viable et rentable par rapport aux autres configurations.

III.6.5 Quatrième configuration (PV + GE + Chargeur de voiture électrique)

Dans la quatrième configuration, nous allons redimensionner le système hybride de la troisième configuration, car, nous allons ajouter un chargeur électrique pour recharger les voitures électriques au niveau du site. De ce fait, nous avons renforcé le champ des panneaux photovoltaïques (44 panneaux) mis tous en parallèle. La tension délivrée par chaque module c'est 79,11V ainsi que le système de stockage (8 strings), chaque string contient quatre batteries en série ce qui garde la même capacité de CB = 1100 Ah pour chaque string donc la capacité finale ce système stockage est 8800 Ah.

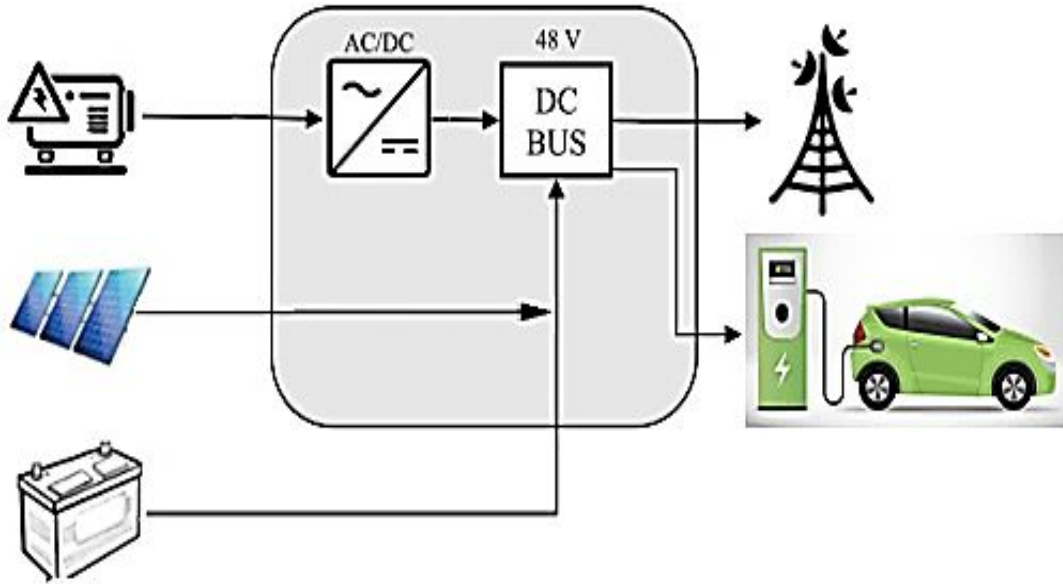


Figure III.15 : Configuration « PV + GE + Chargeur VE » pour l'alimentation d'un site de télécommunications isolé

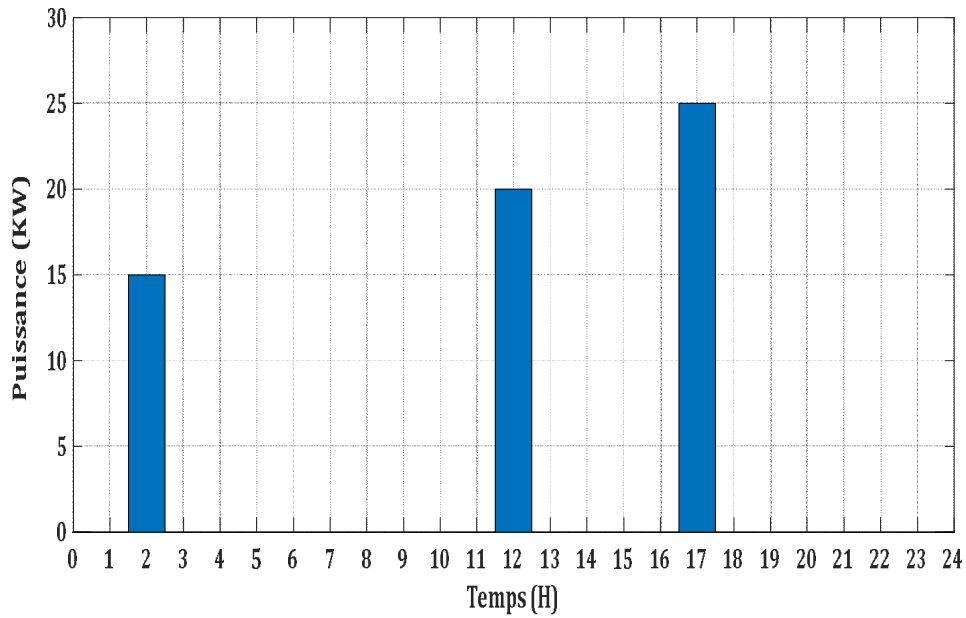


Figure III.16 : Profil de charge des véhicules électriques

III.6.5.1 Démarrage des calculs

Les résultats obtenus pour cette configuration sont affichés dans le tableau III.14.

Tableau III.14 : Résultats obtenus du système (PV + GE + chargeur des VEs)

Paramètres	PV + GE
Diesel (L)	2473
Durée de fonctionnement du GE par jour	2.71H/24H
Durée de vie prévue du GE	30 ans
CO ₂ (kg/an)	1348
CO (kg/an)	2.23
PM (kg/an)	0.278
NO _x (kg/an)	22.1
L'énergie totale produite (kWh/an)	47619
Le coût de capital initial (\$)	31400
Le coût d'exploitation (\$/an)	7717
Le coût de l'électricité (\$/KWh)	0.286
Le coût de système total (CAN) (\$)	40777

A travers cette configuration, nous avons obtenu un coût total de 40777 \$ (5661282.95 DA) pour une année de fonctionnement, et un coût d'exploitation d'une valeur de 7717 \$/an (1071797.92 DA/an), avec un coût de capital initial de l'ordre de 31400 \$ (4359425.28 DA). Le coût de l'électricité obtenu est de l'ordre de 0.286 \$/KWh (39.72 DA). La production autonome du GE nécessite 2476.5 L de carburant par an pour une durée de fonctionnement de 2.71 H/jour. Pour ce cas de figure, nous avons enregistré les émissions suivantes des gaz: CO₂ (1348 kg/an), CO (2.23 kg/an), PM (0.278 kg/an), et NO_x (22.1 kg/an). La figure III.17 montre les détails de la production annuelle d'électricité du système.

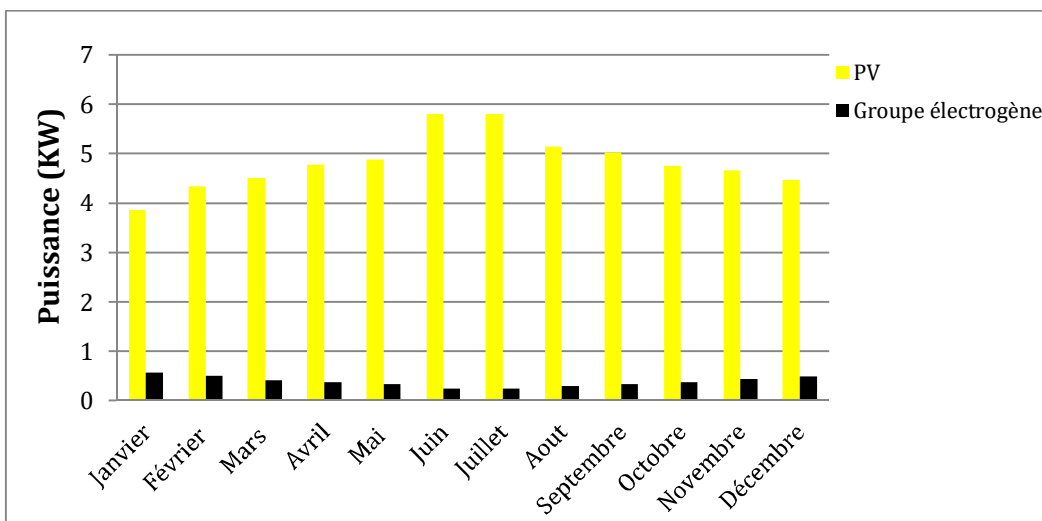


Figure III.17 : Statistiques sur la production et la consommation annuelles d'électricité du système

Une énergie produite totale de 47619 kWh/an (100%). Cette distribution d'énergie donne une fraction d'énergie renouvelable (FR) de 97 %. On constate que les énergies mises en jeu dans le système présentent un caractère continu de disponibilité de l'énergie produite durant toute l'année étant donné que la charge non satisfaite et le déficit sont négligeables, ce qui est très satisfaisant pour les clients (charge satisfaite à 100%).

Tableau III.15 : Comparition entre le système (PV + GE) et le système (PV + GE + chargeur des VEs)

Paramètre	PV + GE	PV + GE + VE
Le coût de capital initial (\$)	16600	31400
Le coût de l'électricité (\$/KWh)	0.340	0.286
Nombre de string des batteries	3	8
Nombre des panneaux photovoltaïque	16	44
L'énergie totale produite (kWh/an)	18315	47619
Consommation énergétique quotidien (KWh/jour)	36.84	90.84
Le coût de système total (CAN) (\$)	24145	40777

Notons que la consommation d'énergie pour le système (PV + GE + chargeur des VEs) est environ deux fois et demie plus élevée que le système (PV+GE). Ceci est justifié par le dimensionnement des deux systèmes en termes de nombre de panneaux solaires, la puissance nominale de groupe électrogène, et le système de stockage utilisé (nombre de string). L'énergie totale produite (kWh/an) par le système (PV + GE+ chargeur des VEs) très raisonnable, et le coût de l'électricité (\$/KWh) pour le nouveau système (PV + GE + chargeur des VEs) devient moins cher par rapport au système (PV+GE), suite aux bénéfices supplémentaires obtenus par la recharge des véhicules électriques [39-40].

Les résultats de simulation ont démontré que le système hybride (PV + GE + chargeur des VEs) est le plus rentable sur la durée de vie du projet, avec un coût énergétique actualisé de 0.286 \$/KWh (39.72 DA/KWh).

On constate donc que la solution hybride avec batteries et chargeur de véhicules électriques est plus fiable et plus économique que les autres solutions (groupe électrogène seul et le système hybride). Le dimensionnement du système de production d'énergie hybride PV/ groupe électrogène se fait sur la base de la connaissance du

potentiel énergétique du site et après évaluation des besoins quotidiens du site isolé étudié. Pour modéliser le système hybride proposé, nous avons choisi une chaîne de conversion photovoltaïque, une modélisation des cellules qui composent les panneaux, pour pousser notre champ à fonctionner à sa puissance maximale quelles que soient les conditions climatiques [41-42].

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la rentabilité technique, économique et environnementale du système hybride (les panneaux photovoltaïques avec le système de stockage et le groupe électrogène) par rapport à des solutions classiques déjà utilisées pour alimenter les sites isolés en Algérie.

D'après les résultats de la simulation, les solutions utilisant des systèmes hybrides sont plus avantageuses par rapport au groupe électrogène seul. Compte tenu des performances techniques de la solution hybride, on constate que la production d'énergie électrique est plus élevée dans le système hybride. Ceci est principalement dû à la part d'énergie renouvelable utilisée dans le système.

Les résultats obtenus montrent aussi que le PV seul ne figure pas dans les solutions proposées et discutées, car nous avons exigé une alimentation continue de la charge sans coupure envisagée. Avec tous d'les avantages techniques et économiques et même écologiques d'un tel système, nous avons également ajouté un chargeur pour voitures électriques au niveau du site de télécommunications, ce qui a permet de diminuer encore davantage le prix du KWh. Le chapitre suivant sera consacré à l'amélioration de l'efficacité énergétique de la meilleure configuration obtenue dans ce chapitre.

Chapitre IV

Amélioration de l'efficacité énergétique du système d'alimentation d'un site de télécommunications

IV.1 Introduction

L'alimentation électrique des sites de télécommunications représente une part importante des coûts d'une station de base.

Pour élaborer des solutions énergie verte qui soient viables, l'efficacité énergétique est donc un élément important, en particulier pour les stations qui ont des besoins énergétiques plus élevés. Une conception améliorée et novatrice permettra de réduire les coûts liés à l'extension des réseaux mobiles vers des zones isolées qui ne sont pas raccordées au réseau électrique.

Le présent chapitre a pour objectif principal d'améliorer l'efficacité énergétique d'un système d'alimentation hybride destiné à un site de télécommunications, notamment en milieu rural et régions éloignées. Cela ne peut pas être possible sauf en présence d'un processus de suivi à travers un algorithme de contrôle que nous allons proposer dans ce chapitre. Cela semble indispensable pour une meilleure adaptation source/charge, permettant ainsi une gestion rationnelle de l'énergie en cas de brusques changements de température et ensoleillement. D'après notre auscultation, les charges de télécommunication sont souvent sollicités par une demande continue de l'utilisateur, ils sont, en ce cas très vulnérable et dépendant du changement de demande processus, puis doit être soigneusement étudié et traité.

Dans ce cadre, un algorithme à été développé pour assurer la fiabilité continue et durable de l'énergie produite, selon les priorités bien définies, afin de gérer rationnellement la production et la consommation énergétique de notre système d'alimentation hybride.

L'objectif étant de contrôler de manière optimale le processus de la gestion de l'énergie dans un site de télécommunications isolé, de sorte que cette gestion garantira une réduction de la consommation d'énergie fournie par le moteur diesel et favorisera fortement la contribution de la production en provenance des énergies renouvelables et du système de stockage.

IV.2 Les principaux aspects des sites de télécommunications

Les sites de télécommunications ont besoin d'adapter les systèmes traditionnels de gestion à des systèmes plus robustes et plus efficaces.

Le point le plus critique à prendre en compte dans les installations de télécommunications est d'assurer la continuité de l'alimentation, puisque tout incident sous cet aspect provoque de sérieuses réclamations de la part des utilisateurs, outre exiger la présence humaine pour la solution du problème [43].

D'un point de vue énergétique, les objectifs principaux pour un site de télécommunications sont les suivants:

1. Continuité de l'alimentation ;
2. Gestion de l'efficacité énergétique ;
3. Création du système de gestion.

IV.3 Alimentation en électricité d'un site de télécommunications

Le système d'alimentation électrique d'une station de télécommunications est conçu en fonction des spécificités du site et de la disponibilité des sources d'énergies renouvelables, et le coût optimisé de l'installation. L'utilisation d'un générateur diesel est facultative, car il sert comme une source auxiliaire. Son temps de fonctionnement est donc peu élevé. Il requiert alors peu de maintenance et sa consommation en diesel est faible. Cette approche convient tout particulièrement aux systèmes de taille relativement importante et présentant des particularités locales.

Partant d'un fonctionnement 24 heures sur 24 et sur 7 jours sur 7 avec 1 à 2 générateurs, l'approche choisie pour les sites isolés est actuellement celle d'optimiser le coût total de l'installation. La réduction de la consommation en diesel et des intervalles de maintenance est ici cruciale. La mise en œuvre d'un système hybride générateur/batterie peut améliorer le coût total de l'installation grâce à la prise en charge par une batterie de l'alimentation des consommateurs et grâce à la charge de la batterie par le générateur uniquement 1 à 2 fois par jour et pendant quelques heures.

Une telle solution permet de réduire considérablement le temps de fonctionnement et la maintenance du générateur tout en augmentant sa durée de vie et sa performance. Grâce aux économies ainsi réalisées, le coût total de l'installation est la plupart du temps plus faible que celui généré en cas de fonctionnement permanent du générateur, et ce, bien que la batterie doive être souvent remplacée en raison d'une forte sollicitation.

Un pur système hybride générateur/batterie sans source d'énergies renouvelables convertit habituellement chaque jour la capacité nominale complète, par exemple avec deux décharges jusqu'à un état de charge de 40 %. Le débit d'énergie constamment très élevé provoque une quantité importante de chaleur perdue. Outre les débits importants, la hausse de la température constitue le facteur principal d'accélération du vieillissement de la batterie. C'est pourquoi, il est toujours avantageux d'intégrer une part de sources d'énergies renouvelables qui pourra assumer une charge de maintien quotidienne en cas de consommation constante d'une BTS.

La sollicitation et le réchauffement de la batterie sont alors considérablement réduits et la durée de vie de la batterie prolongée. Utiliser le générateur pour la charge de maintien de la batterie constitue une solution très inefficace, étant donné que la part du fonctionnement à vide dans la consommation par kilowattheure est très élevée, dont le but de notre travail [44].

IV.4 Présentation du site de télécommunications étudié

Le site est une station BTS, propriété de l'un des opérateurs algériens de réseaux de téléphonie mobile, situé à la wilaya de Béchar, en bordure de la route nationale n°6 dans une zone isolée. Le rayonnement solaire annuel moyen dans cette région est estimé à 5,52 KWh/m²/jour. La puissance totale de l'équipement de communication instantanée est évaluée à partir de l'écran du groupe électrogène (puissance générée), tout au long de la journée, car l'équipement de communication fonctionne 24h/24h. Le site dispose de deux générateurs diesel qui fonctionnent en alternance pour assurer une utilisation efficace et de prolonger la durée de vie de l'équipement. Pour éviter d'avoir à faire le plein tous les 15 jours, un réservoir de carburant est installé avec transfert automatique du gazole vers les unités.

IV.4.1 Présentation du système d'alimentation hybride

Cette partie de notre travail vise à remplacer le deux groupes électrogènes de notre site par le système hybride qui a été proposé à la fin du chapitre 3 (configuration 04), composé de panneaux solaires, d'un système de stockage, d'un seul générateur diesel et d'un chargeur de véhicules électriques. Pour cela, nous avons développé un algorithme de commande afin d'optimiser et d'économiser la consommation du carburant en favorisant la production renouvelable.

Sur la figure IV.1, le système hybride est composé de quatre parties essentielles :

- 1- Un groupe électrogène diesel fonctionnant comme un groupe électrogène central ;
- 2- Un champ de panneaux photovoltaïques produisant de l'énergie renouvelable
- 3- Un système de stockage placé à côté de la charge et du site de télécommunications ;
- 4- Finalement ; le chargeur des véhicules électriques.



Figure IV.1 : Configuration des équipements de télécommunications du système et du chargeur pour véhicule électrique

IV.5 Généralités sur les véhicules électriques

A l'heure actuelle, l'autonomie de l'ensemble des VEs proposés par les constructeurs comprennent des batteries qui peuvent développer une vitesse de (70 km à 200 km). La gamme de puissance s'étale d'environ 15 kW jusqu'à environ 100 kW. C'est l'utilisation des véhicules qui guident le choix de puissance, dont 20 à 30 kW sont suffisantes pour un véhicule urbain alors que 40 à 50 kW sont préférables pour une voiture routière.

Les véhicules électriques sont dotés d'une batterie qui stocke l'énergie et se recharge grâce à l'électricité du réseau, d'un ou plusieurs moteurs électriques avec un système de contrôle et d'un chargeur de batterie.

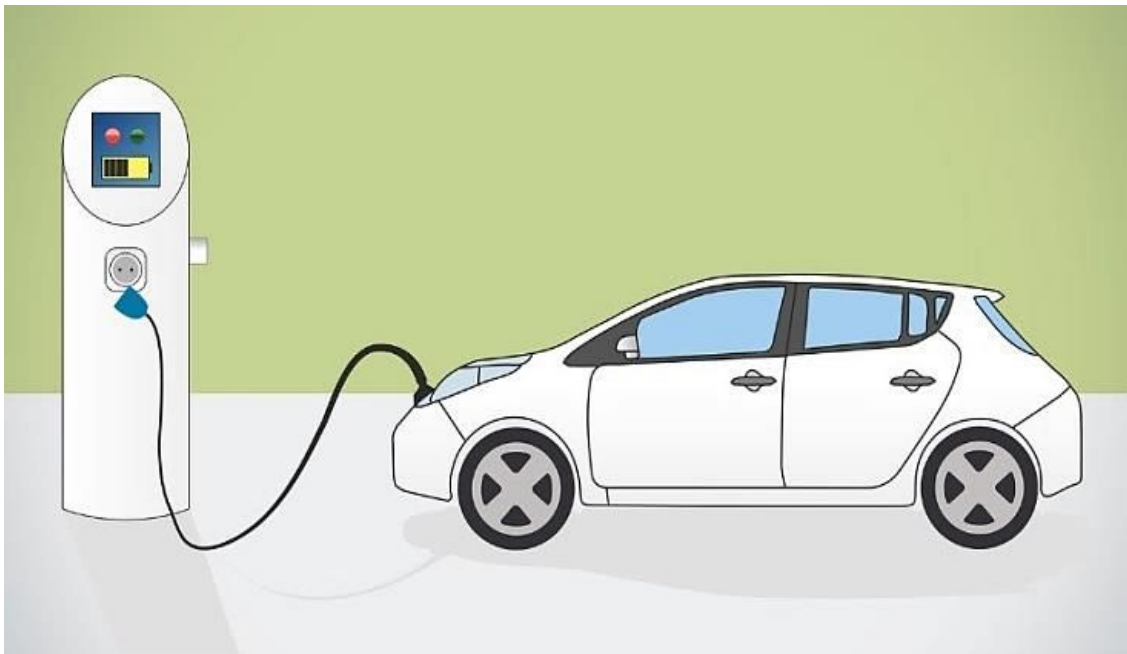


Figure IV.2 : Véhicule électrique

La batterie est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur. Son fonctionnement est assez simple : lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de l'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (DC) de la batterie en courant alternatif (AC) pour alimenter le moteur (cas d'un moteur AC) [45].

Le convertisseur est une partie intégrante du moteur. Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique. En effet, un véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces spécificités sont celles d'un moteur électrique.

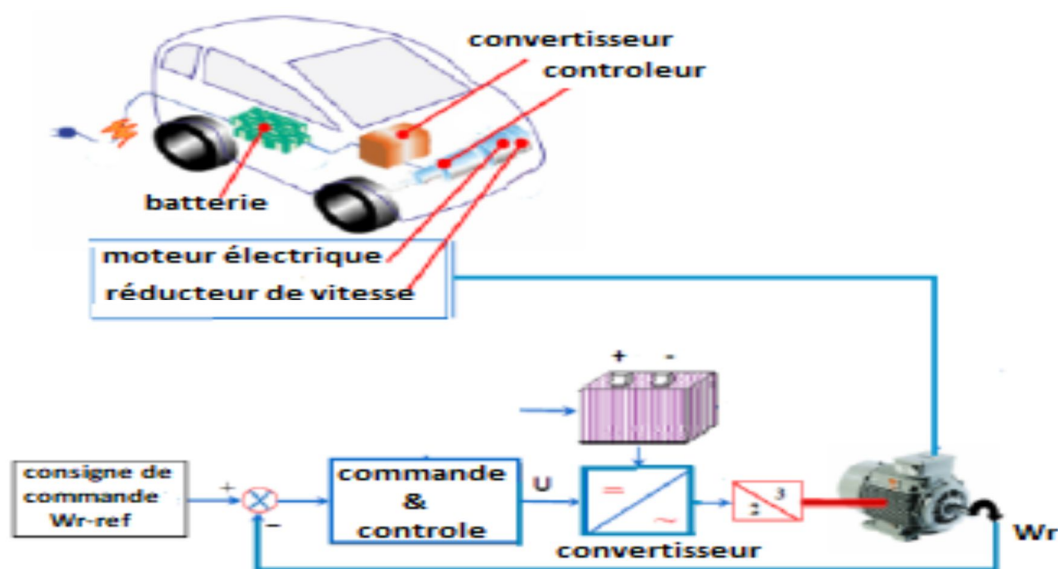


Figure IV.3 : Composantes et fonctionnement d'un véhicule électrique

IV.5.1 Classification des véhicules électriques

Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions des VE sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces explorations sont liées à une problématique commune : la production, le transport, le stockage et l'utilisation de l'électricité.

IV.5.1.1 Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant

Les véhicules électriques fonctionnant avec des batteries, constituent aujourd'hui l'essentiel du parc mondial des véhicules électriques. Une batterie est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite. C'est à ce jour le système le mieux adapté pour l'alimentation des véhicules électriques. Son invention remonte au 19^{ème} siècle, il est, de ce fait, le système de stockage le mieux maîtrisé techniquement.

IV.5.1.2 Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible

Les VE à pile à combustible sont semblables aux autres véhicules électriques sauf qu'ils produisent leur propre électricité à bord. La source de cette électricité est la pile à combustible, un dispositif électrochimique semblable à une batterie à plusieurs égards. Plutôt que de stocker et relâcher l'énergie électrique comme une batterie, une pile à

combustible produit toutefois de l'électricité par réaction chimique aussi longtemps qu'elle reste alimentée en carburant.

IV.5.2 Description générale de la chaîne de traction

La chaîne de traction d'un VE est plus simple que celle d'un véhicule thermique. Le choix et l'arrangement des composants qui constituent la chaîne de traction décrits dans la figure IV.4.

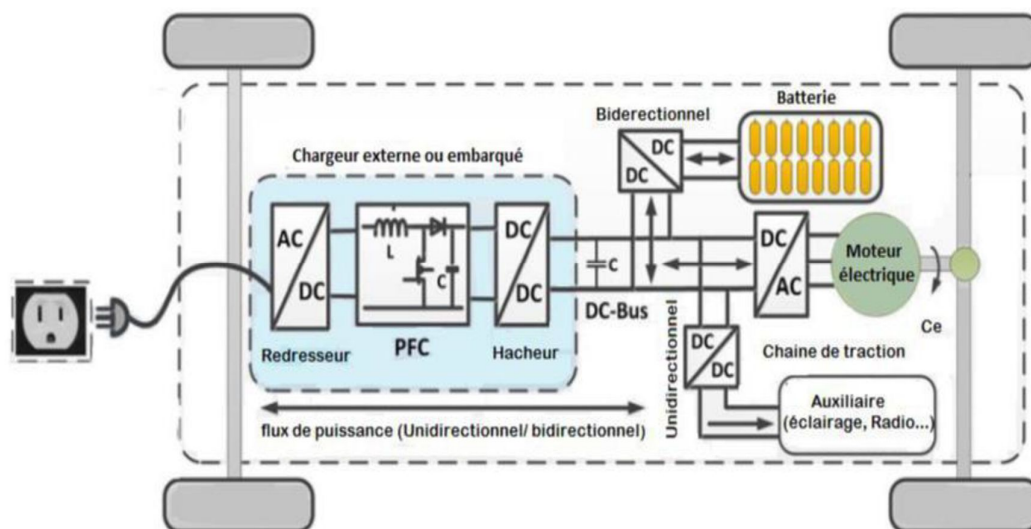


Figure IV.4 : Structure de la chaîne de traction dans un VE

Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur.

Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique, ainsi que la gestion des flux d'énergie entre eux restent au stade de la recherche [46].

IV.5.2.1 Les redresseurs (AC/DC)

Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisées pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie, soit par le réseaux de distribution générale, soit par un alternateur placé à bord du véhicule et accouplé à un moteur

thermique, en énergie électrique à courant continu qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques ou dans une batterie de grande capacité.

IV.5.2.2 Les onduleurs (DC-AC)

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le ou les moteurs de traction un dispositif de conversion appelé onduleur, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage.

IV.5.2.3 Les hacheurs (DC-DC)

Un hacheur est un convertisseur de courant qui permet d'obtenir à partir d'une source de tension à courant continu de valeur sensiblement constante, des tensions et des courants contrôlés, réglables et adaptés aux besoins nécessaires à l'alimentation des divers récepteurs (capteurs, régulateurs, etc.). Dans un véhicule électrique, les hacheurs ont deux usages essentiels :

- Ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu.
- Ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés (capteurs, régulateurs, etc...).

IV.5.3 Freinage régénératif

Autre avantage pour les véhicules à batterie : ils peuvent générer de l'électricité. Cela s'appelle le « freinage régénératif » ou « mode B ». En effet, lorsqu'un moteur électrique tourne « dans le vide » sans être alimenté en courant, il en fabrique. Cela arrive à chaque fois que l'on retire le pied de la pédale d'accélérateur ou que l'on freine. L'énergie récupérée est ainsi directement injectée dans la batterie.

IV.5.4 La batterie

La batterie est le point de stockage de l'électricité. Elle est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. La batterie est chargée, à partir d'une source extérieure pendant les périodes de repos, le major problème de cette dernière c'est la durée de vie qui n'est pas très grande, et le temps

important qu'elle prenne pour se charger. Elles peuvent être en plomb, en Ni-Cd, en Ni-Mh ou en lithium (figure IV.5).



Figure IV.5 : Différents types de batteries

IV.5.4.1 Les batteries au plomb

Représentent la technologie la plus ancienne, elles furent utilisées dans les premiers temps des VE, aujourd'hui sont largement délaissées. La raison en est leurs caractéristiques énergétiques et de puissance plus faibles par unité de masse que les autres solutions disponibles.

IV.5.4.2 Les batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd)

Largement utilisées au XXe siècle, souffrent en partie des mêmes problèmes que celles au plomb en termes de performances. Et la toxicité du cadmium contenu dans ces batteries fait que leur usage est très encadré et que leur application risque d'être limitée.

IV.5.4.3 Les batteries au nickel-hydrure métallique (Ni-MH)

Sont largement utilisées à l'heure actuelle dans les VEH, et sont réputées avoir une longue durée de vie et une meilleure densité énergétique que les deux premières. Pour autant leurs performances restent encore trop faibles pour être le seul conteneur d'énergie d'une voiture.

IV.5.4.4 Les batteries au lithium

Ce sont celles qui présentent le meilleur rapport masse-puissance et masse-énergie. Par ailleurs elles ne souffrent pas de « l'effet mémoire » (une perte de capacité

lorsqu'elles sont rechargées avant d'être complètement déchargées). La plus utilisée est la batterie Lithium-ion, les chercheurs pensent que se composant prolongerait de façon conséquente l'autonomie du véhicule.

En effet, il serait possible que le véhicule puisse parcourir plus de 200 km avec cette batterie de nouvelle génération. En outre, la batterie au lithium favoriserait un abaissement des coûts de consommation et gagnerait facilement de la sorte la faveur des acheteurs [47].

IV.6 Chargeurs des véhicules électriques

Les chargeurs de batteries sont spécifiques au type d'alimentation électrique à leur emplacement (embarqués ou non au sein du véhicule) et au mode de transmission de l'énergie. Pendant la charge, la batterie se comporte comme un récepteur de courant. Il existe différentes structures d'électronique de puissance qui sont classées en deux catégories, la première catégorie concerne les chargeurs de fortes puissances, ils sont qualifiés de chargeurs rapides. Le second type est réservé aux recharges de moyenne puissance, on parle de chargeurs lents [48].

IV.6.1 Les chargeurs de type " lents "

Le chargeur de type "lent" est un dispositif d'une puissance moyenne, généralement de 3 kW. Ce dispositif permet la charge continue d'une batterie de stockage pour compenser ses fuites interne normales. Il nécessite pour une charge complète du pack de batteries une durée de 5 à 8 heures. Cette opération peut donc s'effectuer en heures creuses. Pour pallier le problème de la "panne sèche" en cours de journée. Un système de charge à régime lent comprend un chargeur et une batterie branchés à la charge en permanence. Lorsqu'il y'a une alimentation secteur, le courant de charge est fourni par le chargeur. La batterie est chargée à régime lent et n'est utilisée que pour couvrir des surintensités de charge dépassant le régime du chargeur. Lorsque l'alimentation secteur s'arrête, la batterie fournit le courant à pleine charge. Deux types de chargeur "lent" sont actuellement développés.

IV.6.1.1 Chargeur classique

Ce chargeur est généralement embarqué dans le véhicule. Il se connecte sur le réseau 230 V - 16 A. Les structures utilisées pour la charge "lente" sont généralement à

absorption sinusoïdale ou quasi-sinusoïdale permettant ainsi de répondre aux normes régissant les harmoniques basses fréquences et incluent une isolation galvanique. Les principaux avantages du chargeur "classique" sont de pouvoir se connecter facilement (utilisation de la prise classique 16 A - 230 V) et de permettre une charge complète du pack de batteries assurant sa longévité. Ses principaux inconvénients sont de nécessiter un temps de charge important et d'occasionner un supplément de poids et de prix non négligeables pour le véhicule.

IV.6.1.2 Chargeur à coupleur inductif automatique

Le système de connexion automatique a été développé afin de rendre le processus de charge complètement transparent pour l'utilisateur. Il stationne son véhicule sur l'emplacement réservé à la charge, un dispositif mécanique effectue le couplage magnétique. Le système gère alors toute la charge sans aucune manipulation pour l'automobiliste et se met bien sûr en fonctionnement une fois le paiement validé [49].

IV.6.2 Les chargeurs de type " rapides "

Les structures, dont la puissance transmise est supérieure à 10 kW, ont été classées dans les chargeurs dits rapides. La puissance maximale atteint aujourd'hui 150 kW [50]. L'objectif de ce type de montage est de permettre, en peu de temps (inférieur à 30 min.) une recharge partielle (80 %) des batteries.

IV.6.2.1 Les bornes de recharge

Ces dispositifs sont destinés à être placés sur la voie publique. Ils possèdent un système de paiement intégré comme le sont aujourd'hui les stations services dites 24h / 24h. Plusieurs systèmes sont actuellement développés sur ce principe. Dans le cadre du projet européen « EUREKA 93 », les Sociétés SAGEM et E.D.F. ont développé une borne de recharge rapide. Elle se connecte directement sur le pack de batteries par l'intermédiaire d'une prise spécialement étudiée. La puissance qui a été choisie pour ce système est de 35 kW. Cela permet à la batterie d'un petit véhicule (Clio, AX, 106, ...) d'atteindre 70 % de sa capacité en 20 minutes. Sa large plage de tension (45 V - 425 V) lui permet de s'adapter à beaucoup de véhicules et de jouer ainsi parfaitement son rôle de « station service » [51-52].

IV.6.2.2 Chargeurs à coupleur inductif manuel

Du point de vue de l'utilisateur, ce genre de structure n'apporte pas de différence notable par rapport aux bornes de recharge type "SAGEM". La différence réside dans le système de prise de raccordement. Elle ressemble dans le cas de ces structures à une "raquette" que l'on introduit dans une fente se situant sur le véhicule.

IV.6.3 Chargeurs filaires

Les chargeurs filaires nécessitent obligatoirement une connexion par câble pour pouvoir alimenter la batterie. Ces derniers peuvent être externes ou embarqués, suivant l'application et surtout les niveaux de puissance mis en jeu. Les structures de chargeurs sont diverses et variées, mais elles peuvent se classer dans deux catégories, qui sont les unidirectionnelles et les bidirectionnelles.

Tableau IV.1 : Donne une estimation du temps de recharge selon les sources d'alimentation

Durée de recharge	Alimentation	Tension	Courant maximum	Type de charge
6 à 8 heures	Monophasée 3.3 KW	230 VAC	16 A	Lente
2 à 3 heures	Triphasée 10 KW	400 VAC	16 A	
3 à 4 heures	Monophasée 7 KW	230 VAC	32 A	
1 à 2 heures	Triphasée 22 KW	400 VAC	32 A	Rapide
20 à 30 minutes	Triphasée 43 KW	400 VAC	63 A	
20 à 30 minutes	Continue 50 KW	400 à 500 VAC	100 à 125 A	

Les chargeurs varient en fonction de la source d'alimentation électrique mais aussi du type de recharge désiré. La mise en place de ces infrastructures nécessite de gros moyens financiers, ce qui limitera leur nombre et donc leur intérêt. Les caractéristiques des chargeurs de type "rapide" permettent de compléter parfaitement la fonction du chargeur de type "lent" qui reste indispensable pour assurer une plus grande longévité aux batteries. Les chargeurs lents sont généralement embarqués au sein du véhicule, alors que les chargeurs rapides jouant un rôle de stations-services se trouvent à l'extérieur sous forme de bornes de recharge. Les chargeurs filaires sont de plus en plus intégrés au véhicule pour plus de fonctionnalité, Contraignant ainsi leur conception [53-54].

IV.7 Simulation d'un système d'alimentation hybride (PV/Diesel avec chargeur de VE)

Avant la simulation, nous déterminerons les dimensions de tous les éléments du système, notamment après avoir ajouté un chargeur pour véhicules électriques dans le site de télécommunications. Pour cela, nous allons utiliser la modélisation du chapitre deux.

IV.7.1 L'architecture du système hybride

La figure IV.6 montre que les panneaux solaires maintiendront le système alimenté et les batteries chargées. En l'absence de rayonnement optique, le système de stockage interviendra pour compenser l'énergie perdue, mais en l'absence de rayonnement et du système de stockage, le générateur compensera l'énergie perdue lorsque les circuits électriques basculeront automatiquement (via l'interrupteur) [55].

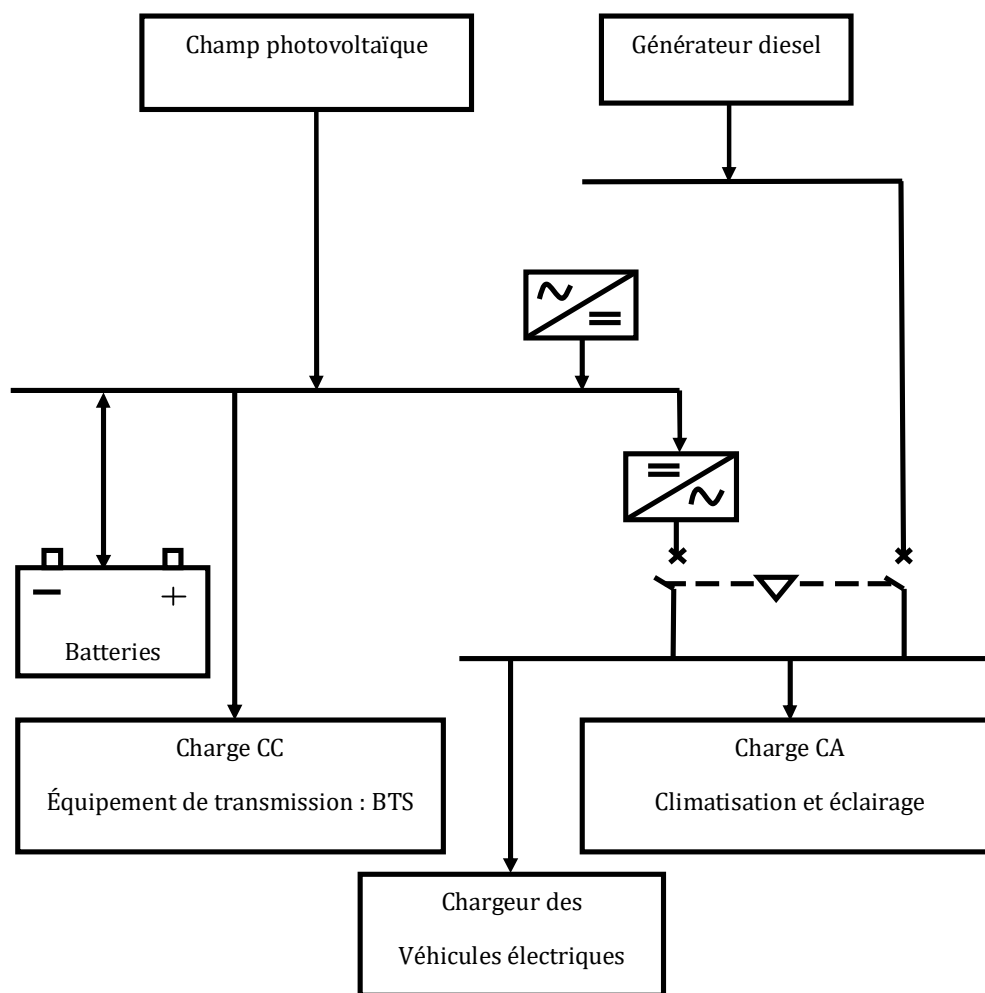


Figure IV.6 : Configuration du système hybride

IV.7.2 Système d'énergie photovoltaïque

Un système photovoltaïque utilise des panneaux solaires composés d'un certain nombre de cellules solaires en série/parallèle pour générer de l'électricité à partir du solaire photovoltaïque. La puissance de sortie du panneau photovoltaïque est donné par l'équation suivante:

$$P_{PV\text{-sortie}} = P_{PV\text{-nominale}} \times \left(\frac{E}{E_{ref}}\right) \times [1 + K_T(T_c - T_{ref})] \quad (IV.1)$$

Où $P_{PV\text{-sortie}}$ est la puissance de sortie de la cellule PV, $P_{pv\text{-nominale}}$ est la puissance nominale PV à la condition de référence, E est l'éclairement solaire (W/m^2), E_{ref} est l'éclairement solaire au standard état de température ($E_{ref} = 1000 W/m^2$), T_{ref} est la température de la cellule comme conditions de référence ($T_{ref} = 25^\circ C$), et K_T est le coefficient de température du module PV. La température de la cellule est:

$$T_c = T_{amb} + (0.0256 \times E) \quad (IV.2)$$

Où T_{amb} est la température ambiante

La durée de vie des panneaux photovoltaïques a été prise comme 20 ans et aucun système de suivi n'a été envisagé. Déclassement le facteur des modules PV a été supposé être de 90 %. Le module de panneau photovoltaïque est modèle « VSG 580 » du fabricant Ertex Solar avec une puissance comme le montre la figure IV.7.



Figure IV.7 : Panneau photovoltaïque

Donc, si on opte pour un $N_{pv} = 44$ panneaux (De la même manière que le deuxième chapitre, nous avons déterminé le nombre des panneaux), la puissance crête du champ sera :

$$P_{pv} = 44 \times 580 = 25520 \text{ W}$$

IV.7.2.1 Effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques I-V

La figure IV.8 présente la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque modèle « Ertex Solar, VSG 580 » (67V 580Wc), pour différents ensoleillements à une température fixe de 45°.

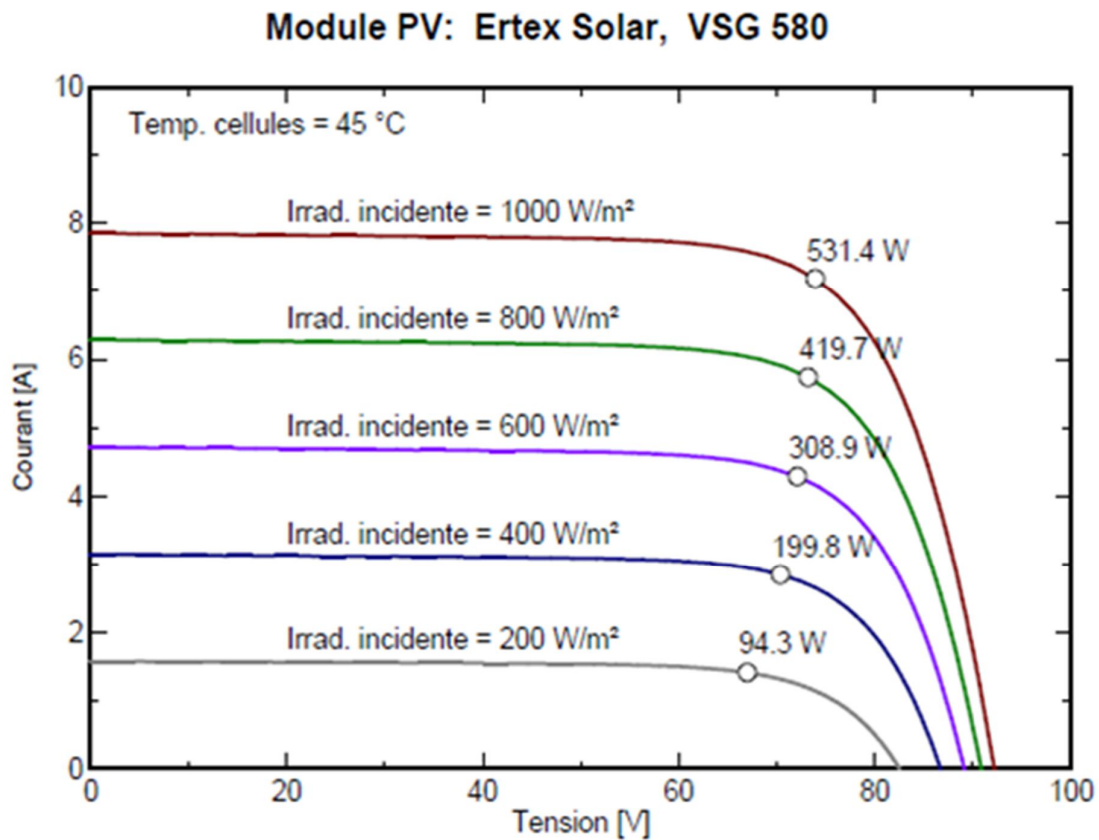


Figure IV.8 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V

D'après la figure IV.8, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension (V) varie légèrement car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique ceci implique donc :

- La puissance optimale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

IV.7.2.2 Effet de température sur les caractéristiques I-V

L'effet le plus important est l'influence de la température qui demandera des choix importants dans la conception des panneaux et des systèmes.

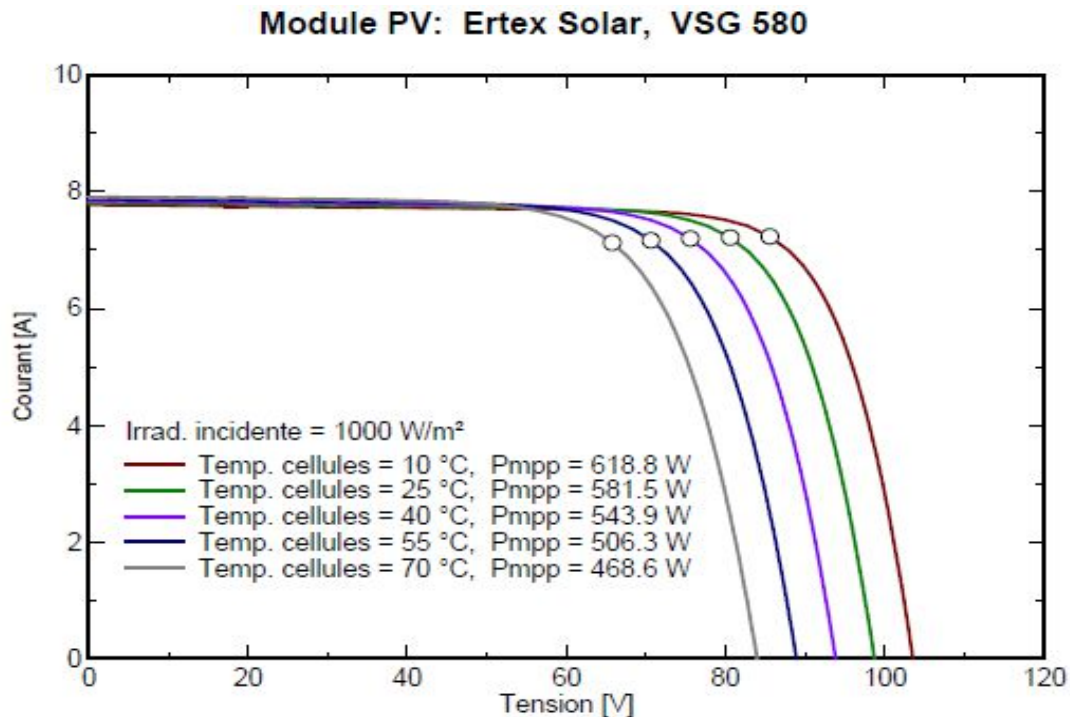


Figure IV.9 : Influence de la température sur la courbe I-V

La figure IV.9 montre l'influence de la température sur la caractéristique I-V d'un module « Ertex Solar, VSG 580 » (67V 580W_c). Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique I(V). Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influence négativement la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

IV.7.2.3 Caractéristiques puissance-tension P-V

Sans tenir compte des caractéristiques I-V, le générateur photovoltaïque peut être défini avec ses caractéristiques de tension-puissance (P-V). Figure IV.10 montre les caractéristiques photovoltaïques P-V de générateur « Ertex Solar, VSG 580 » (67V 580W_c), pour des valeurs différentes d'ensoleillement à une température fixe, alors que la figure IV.11 présente les caractéristiques P-V pour différentes valeurs de températures à un ensoleillement fixe.

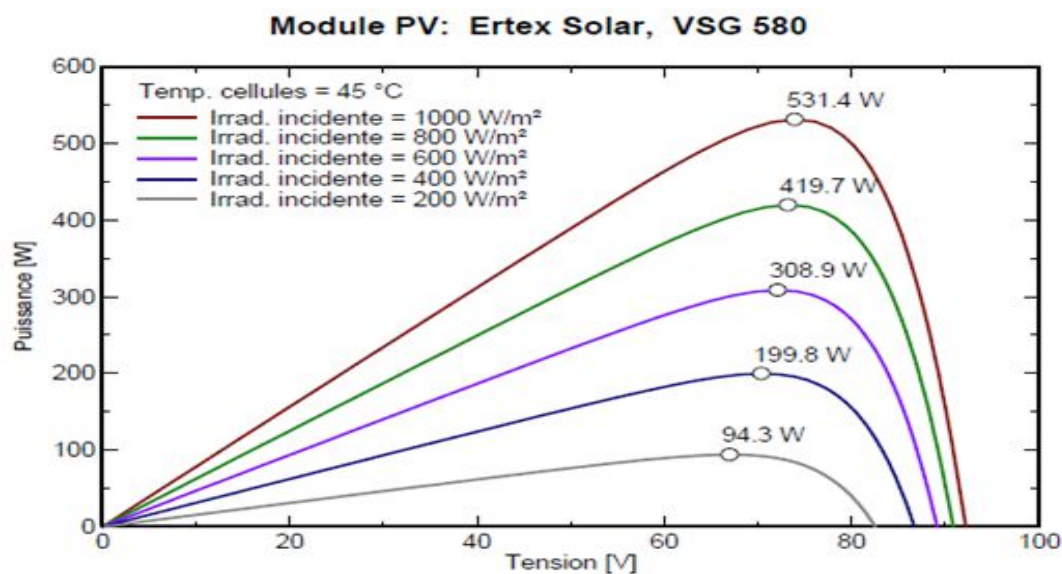


Figure IV.10 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe P-V à température constante

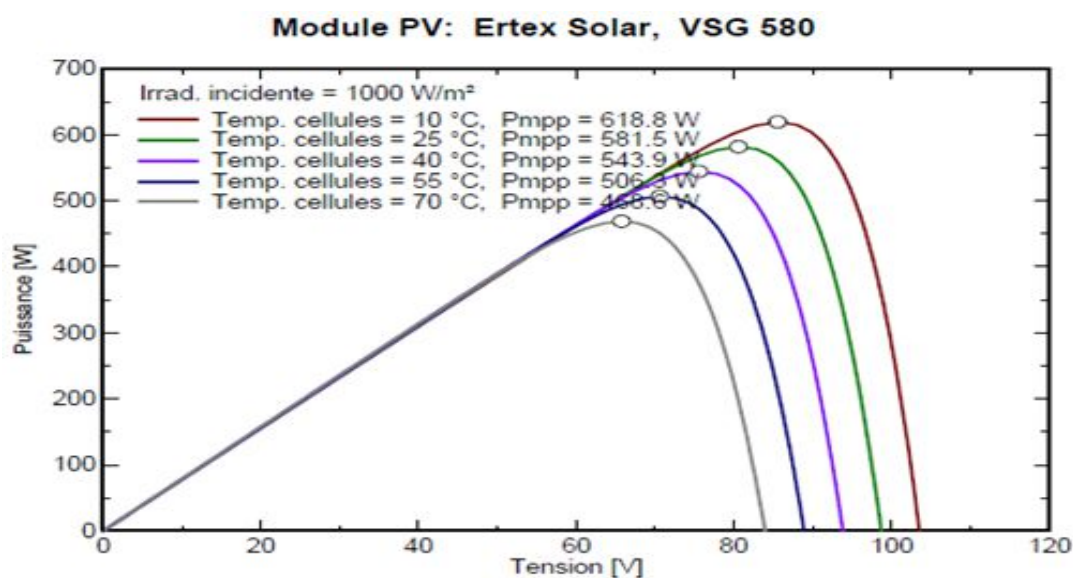


Figure IV.11 : Influence de la température sur la courbe P-V à ensoleillement constant

IV.7.3 Système de stockage d'énergie par batterie

La batterie est un dispositif de stockage essentiel pour stocker l'énergie électrique pour une utilisation maximale des énergies renouvelables intermittentes ressources. La batterie au plomb qui est souvent utilisée dans le système hybride PV/ diesel est un dispositif complexe et non linéaire contrôlant les opérations états du système. Pour notre système les batteries sont de 12 volts avec capacité 275 Ah. L'autonomie du système est assurée par une chaîne de batteries, de type « UCG 275-12 », nous constatons que le nombre de batteries est 32 sous forme de huit string, chaque string contient quatre

batteries en série ce qui garde la même capacité de $C_B = 1100 \text{ Ah}$ pour chaque string donc la capacité finale se système stockage est 8800 Ah , ce qui assure une tension de $V = 48\text{V}$.

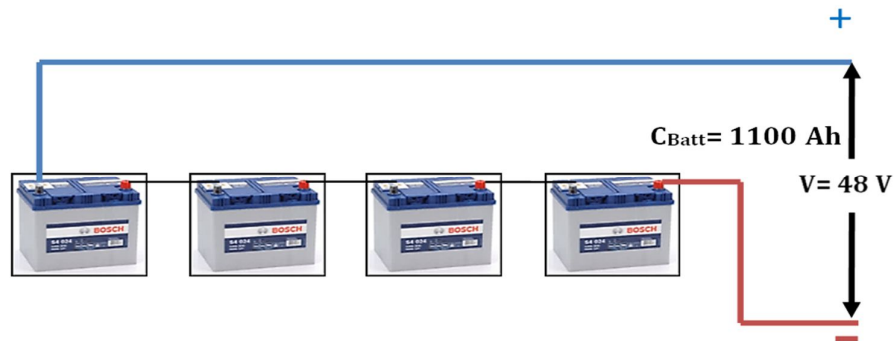


Figure IV.12 : Schéma de montage de champ de batteries

IV.7.4 Groupe électrogène

Dans le cas des installations à sources d'énergies renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes ou les deux au même temps. Dans une installation hybride PV/Groupe électrogène, les batteries ne doivent pas risquer d'être endommagées par une décharge profonde, provoquée par une surconsommation de la charge. A cet effet, l'intégration de groupe électrogène est d'une importance capitale à notre système hybride, il permet une diminution considérable du nombre de panneaux utilisé et aussi de l'investissement initial. Le groupe électrogène, figure (IV.13), est généralement dimensionné pour couvrir le pic de consommation. Par conséquent, on choisit un générateur diesel d'une puissance de 6 KVA [56-57].



Figure IV.13 : Groupe électrogène 6KVA

Tableau IV.2 : Le dimensionnement du système hybride avec le véhicule électrique

PV (KW)	Nombre des panneaux	Batteries (Ah)	Nombre de batteries	Groupe électrogène (KW)
25.5	44	8800	32	6

IV.8 Stratégie de gestion de l'énergie

L'organigramme est une représentation schématique, pour montrer et visualiser le transit de l'énergie, par ordre de priorité et selon son utilité. La figure IV.14 présente un organigramme de gestion de l'énergie de notre système PV/Diesel global [58-59].

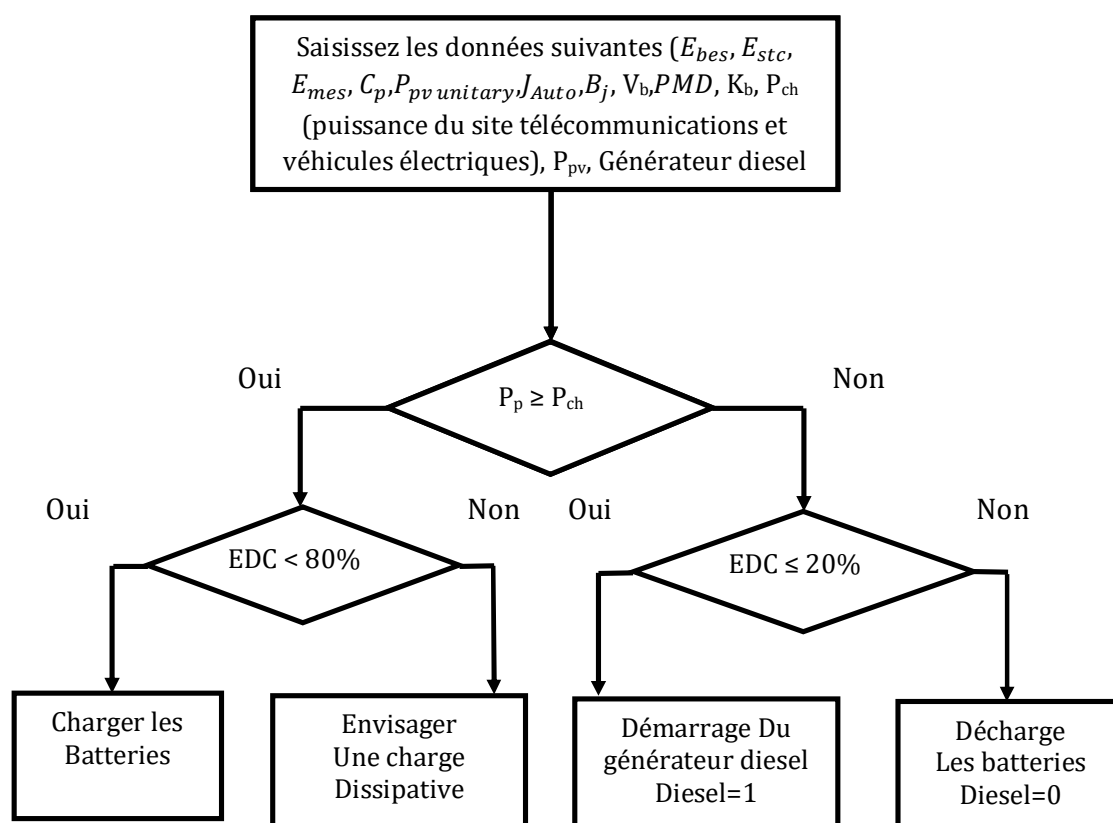


Figure IV.14: Stratégie de gestion d'énergie dans le système hybride PV/Diesel

IV.8.1 Cas n°1 : $P_{pv} \geq P_{ch}$

Si la puissance P_{pv} fournie par le champ PV est supérieure ou égale à la puissance de la charge P_{ch} et que l'état de charge des batteries est inférieur à 80%, le surplus sera fourni aux batteries de stockage. Si l'état de charge des batteries est supérieur ou égale à 80%, le surplus produit par le champ PV sera fourni à la charge dissipative (Les charges

s'écoulent vers la terre plus lentement et de manière un peu plus contrôlée qu'avec des matériaux conducteurs).

IV.8.2 Cas n°2 : $P_{pv} < P_{ch}$

Si la puissance P_{PV} fourni par le champ PV est inférieure à la puissance de la charge P_{ch} et l'état de charge des batteries est supérieure à 20%, les batteries fournissent le déficit d'énergie. Par contre, si l'état de charge des batteries est inférieur ou égale à 20%, le groupe électrogène assure l'alimentation de la charge et le surplus servira à charger les batteries, le groupe électrogène s'arrête lorsque le champ photovoltaïque commence à produire de l'énergie électrique et $P_{pv} \geq P_{ch}$.

IV.9 Scénarios

Le système hybride (champs photovoltaïques avec batteries et groupe électrogène) alimente le site de télécommunications en électricité pendant 24 heures. La présence d'un rayonnement suffisant amène le champ photovoltaïque à produire une puissance élevée pour alimenter la charge ; sinon, le système de stockage alimente la charge. En l'absence de rayonnement suffisant et l'incapacité du système de stockage à fournir de l'énergie, le groupe électrogène alimente la charge. Quant aux véhicules électriques, ils seront rechargés à des heures différentes par un chargeur électrique au niveau du site, en utilisant la recharge rapide : 63 A triphasés = 43 KW en demi-heure. Le tableau(IV.3) suivant résume les scénarios proposés :

Tableau IV.3 : Détail de rechargement des véhicules électriques pendant une journée

Heures	Véhicules électriques	Charge (KW)	Durée de rechargement (min)
02:00	Numéro un	15	11
10:00	Numéro deux	15	11
12:00	Numéro trois	20	14
14:00	Numéro quatre	15	11
17:00	Numéro cinq	25	18
20:00	Numéro six	20	14

IV.9.1 Résultats et discussion

Les résultats de simulation du modèle choisi, avec les scénarii proposés sont présentés comme suit:

Tableau IV.4 : Détail de la consommation électrique du site de télécommunications en une journée

Heures	Charge (KW)	Heures	Charge (KW)
00:00 - 01:00	1.300	12:00 - 13:00	1.850
01:00 - 02:00	1.300	13:00 - 14:00	1.850
02:00 - 03:00	1.300	14:00 - 15:00	1.850
03:00 - 04:00	1.300	15:00 - 16:00	1.850
04:00 - 05:00	1.300	16:00 - 17:00	1.850
05:00 - 06:00	1.280	17:00 - 18:00	2.000
06:00 - 07:00	1.260	18:00 - 19:00	2.000
07:00 - 08:00	1.180	19:00 - 20:00	1.280
08:00 - 09:00	1.180	20:00 - 21:00	1.280
09:00 - 10:00	1.940	21:00 - 22:00	1.300
10:00 - 11:00	1.940	22:00 - 23:00	1.300
11:00 - 12:00	1.850	23:00 - 24:00	1.300

Tableau IV.5 : Consommation globale du site de télécommunications et des véhicules électriques pendant la journée

Éléments	Consommation (KW/Jour)
Six véhicules électriques	110
Site de télécommunications	36.84
Total	146.84

IV.9.1.1 Courbe de charge pour site de télécommunications et véhicules électriques

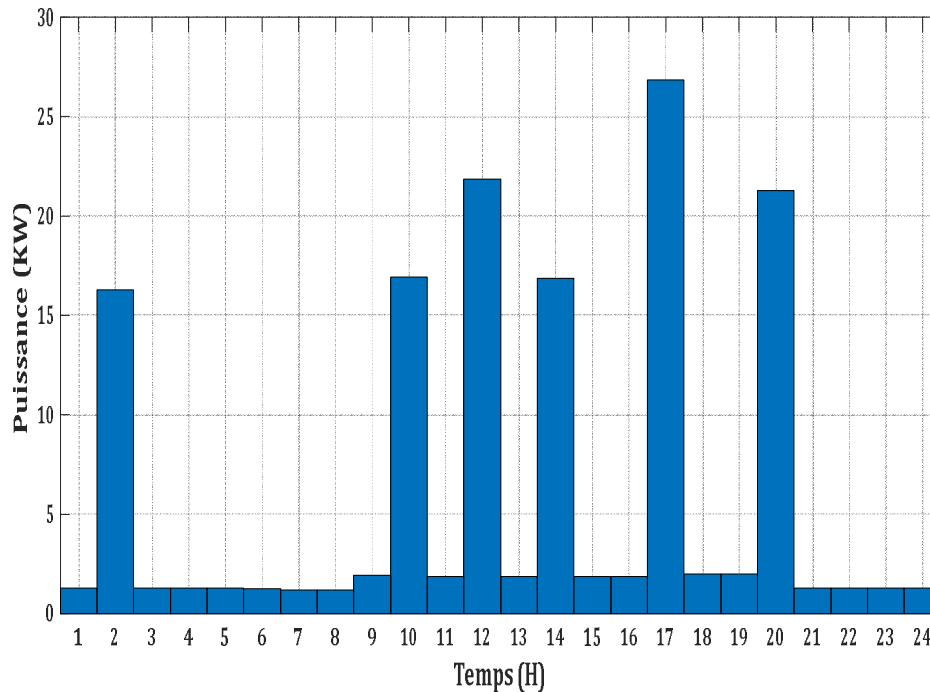


Figure IV.15: Graphique de la consommation journalière du site de télécommunications et des véhicules électriques

La figure IV.15 représente le graphe de la courbe de la consommation totale (site de télécommunications + véhicules électriques) montre six pics de consommation pour notre site isolé, on peut observer que la phase qui prend l'intervalle de 16h00 à 18h00, sa consommation est très élevée à 17h00 (estimée à 26,85 KW). Cette augmentation est due à la fourniture d'énergie électrique aux véhicules électriques à ces moments-là [60-61].

IV.9.1.2 Profil d'ensoleillement

Les valeurs d'ensoleillement typiques sur une période de vingt-quatre heures sont indiquées sur la figure (IV.16). A partir de 06h00, les valeurs d'ensoleillement commencent à augmenter, atteignant le pic à midi, puis elles diminuent pour s'annuler à 18h00.

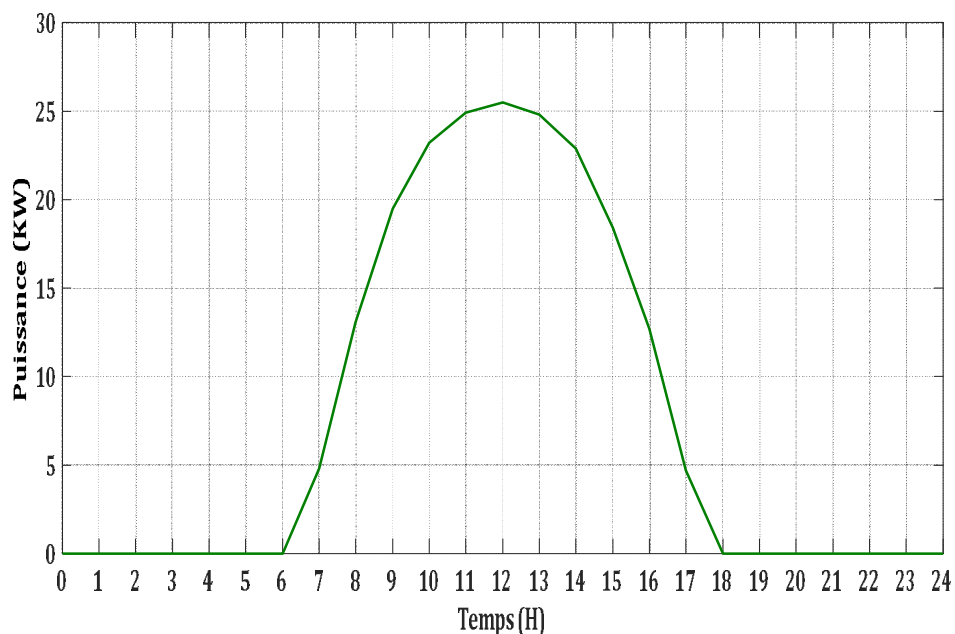


Figure IV.16: Puissance produite par le champ photovoltaïque

IV.9.1.3 Courbe de puissance de la batterie

Les batteries sont une source complémentaire au champ PV, en fin d'alimentation de la charge; nous avons noté l'allure de la puissance fournie par les batteries représentées sur la figure (IV.17). La batterie se charge de 03h00 à 17h00. Il fournit de l'électricité à partir à 17h00 jusqu'à minuit. D'après la forme de la puissance délivrée par la batterie, représentée sur la figure (IV.17).

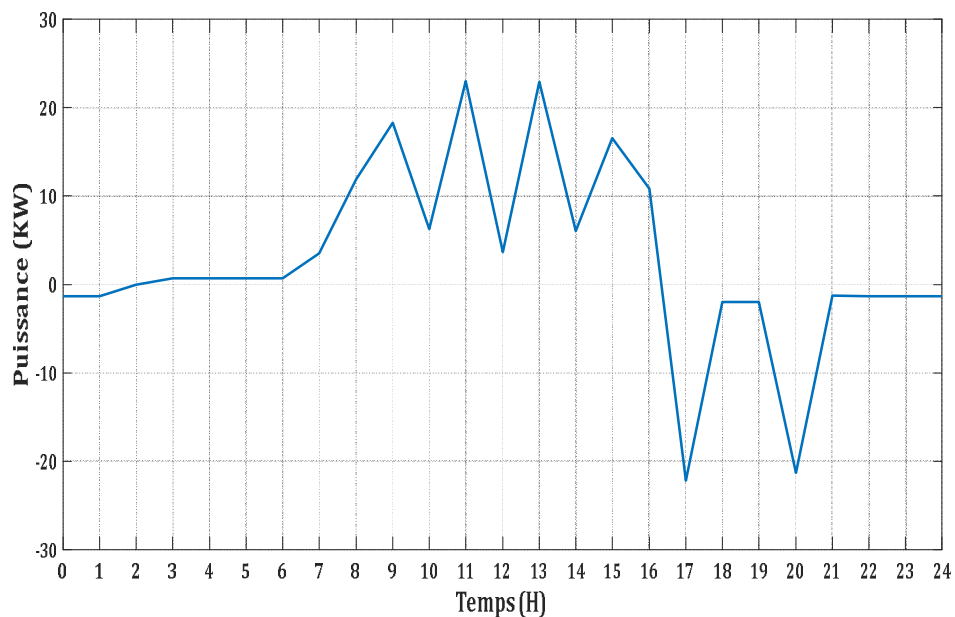


Figure IV.17: Courbe de la puissance délivrée par les batteries avec algorithme

À 10h00, le champ photovoltaïque fournit l'énergie pour recharger le deuxième véhicule électrique d'une capacité estimée à 15 KW, ainsi que le site de télécommunications et le surplus vont aux batteries.

À 12h00, le champ photovoltaïque fournit l'énergie pour recharger le troisième véhicule électrique d'une capacité estimée à 20 KW, ainsi que le site de télécommunications et le surplus vont aux batteries.

À 14h00, le champ photovoltaïque fournit l'énergie pour recharger le quatrième véhicule électrique d'une capacité estimée à 15 KW, ainsi que le site de télécommunications et le surplus vont aux batteries.

À 17h00, la capacité du champ photovoltaïque dans la production d'énergie électrique diminue, de sorte que le système de stockage intervient pour charger le troisième véhicule électrique d'une capacité de 25 KW, ainsi que pour fournir de l'énergie au centre de télécommunications.

À 20h00, le système de stockage fournit l'énergie pour recharger le cinquième véhicule électrique d'une capacité estimée à 20 KW.

IV.9.1.4 Courbe de puissance du groupe électrogène

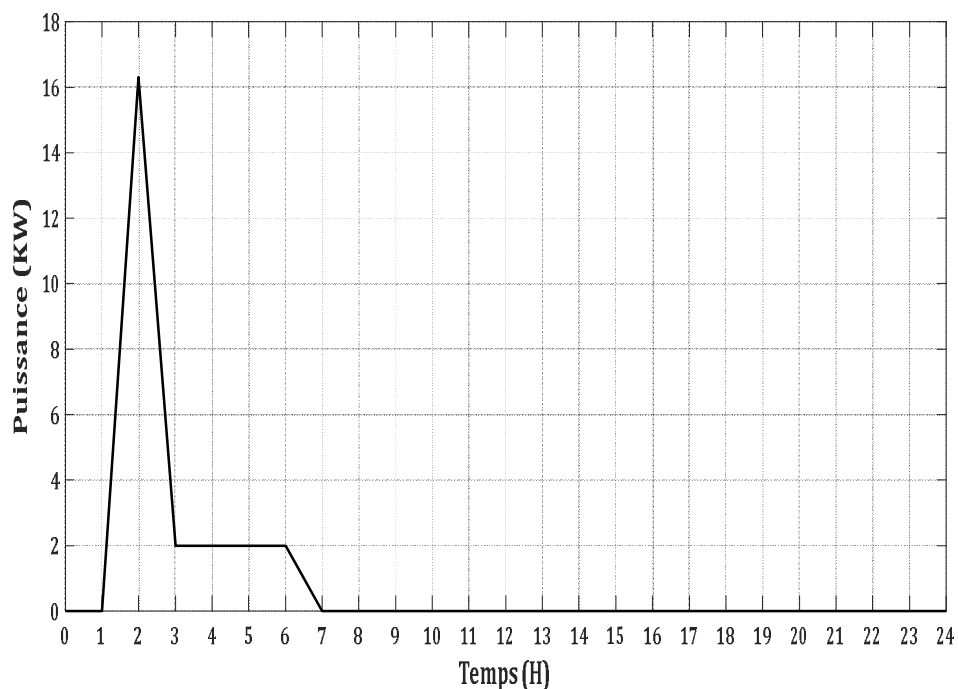


Figure IV.18: Courbe de la puissance délivrée par le groupe électrogène avec algorithme

À deux heures du matin, un groupe électrogène se met en marche pour alimenter le premier véhicule électrique d'une capacité de 15 KW et alimente également le site de

télécommunications avec une charge 1.3 KW donc le totale de charge c'est 16.3 KW à 02h00 jusqu'à ce qu'un champ photovoltaïque apparaisse pour fournir l'énergie nécessaire.

IV.9.2 Comparaison des estimations de disponibilité d'alimentation entre deux architectures respectivement avec et sans stratégie de gestion d'énergie

Dans cette partie de travail, une étude de comparaison a été faite entre la méthode qui consiste à simplement coupler les différentes sources d'alimentations (PV, GE et système de stockage) et celle basée sur un algorithme d'optimisation. Les résultats obtenus montrent que pour une même puissance générée par le site, notre méthode d'optimisation présente un gain supplémentaire comparativement à la méthode traditionnelle sans aucun coût supplémentaire considérable.

La figure IV.19, montre le fonctionnement de notre système dans le cas normal, sans stratégie optimale de gestion de l'énergie. Le fonctionnement peut être résumé comme suit:

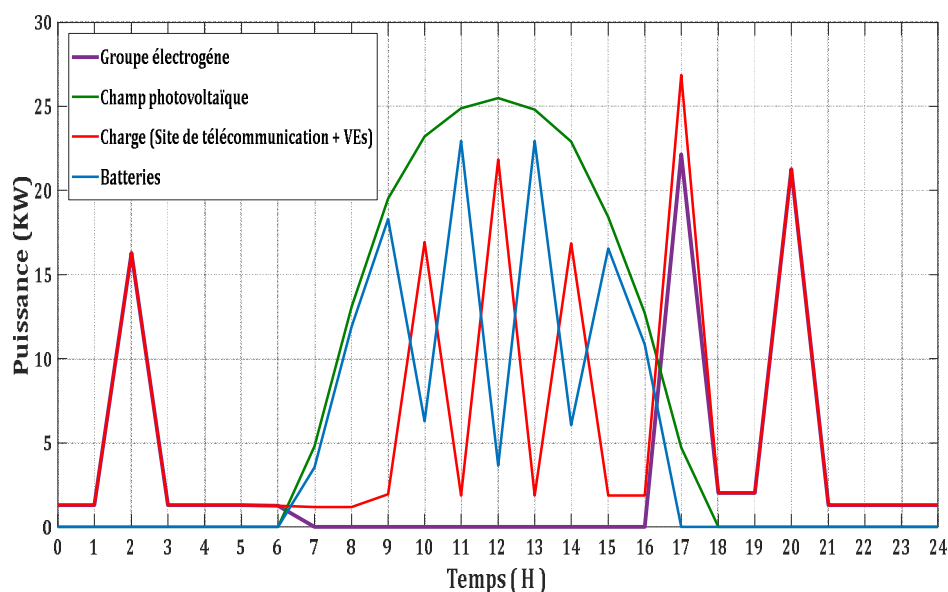


Figure IV.19: Courbes de puissance (PV, Charge, Batteries, GE) « système sans stratégie de gestion »

Nous constatons que le nombre d'heures de fonctionnement du groupe électrogène pour un système sans stratégie de gestion de puissance est plutôt supérieur par rapport à un système utilisant une stratégie de gestion.

Cette dernière s'appuie sur un algorithme de commande permettant ainsi de faire fonctionner notre système selon une stratégie énergétique optimale assurant la

continuité de l'approvisionnement en énergie au moindre coût possible, et réduisant les émissions des gaz à effet de serre.

IV.9.2.1 Les courbes de puissance du GE avec et sans stratégie de gestion

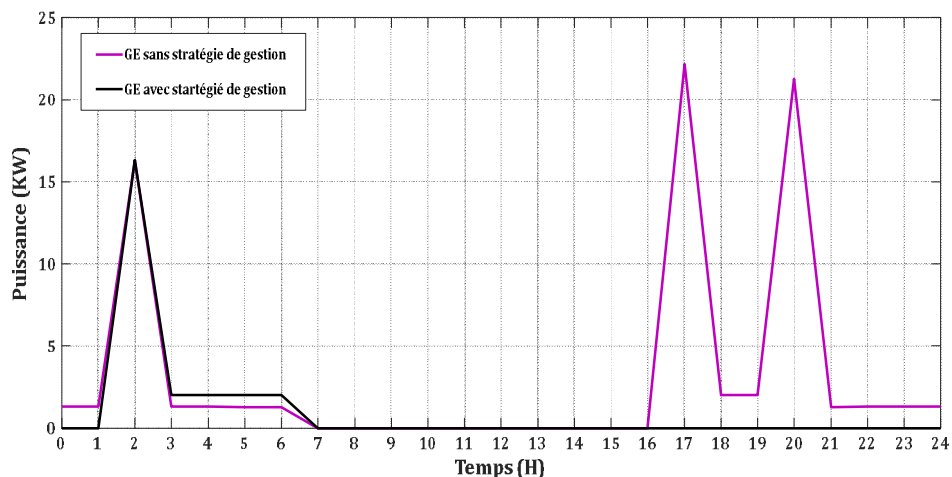


Figure IV.20: Courbes de puissance GE avec et sans stratégie de gestion

À partir la figure IV.20, la stratégie de gestion d'énergie utilisée a permis d'assurer la longévité de notre groupe électrogène diesel et de minimiser les coûts opérationnels (carburant, maintenance..). La réduction d'émission de gaz à effet de serre est également assurée.

IV.9.2.2 Les courbes de puissance de les batteries avec et sans stratégie de gestion

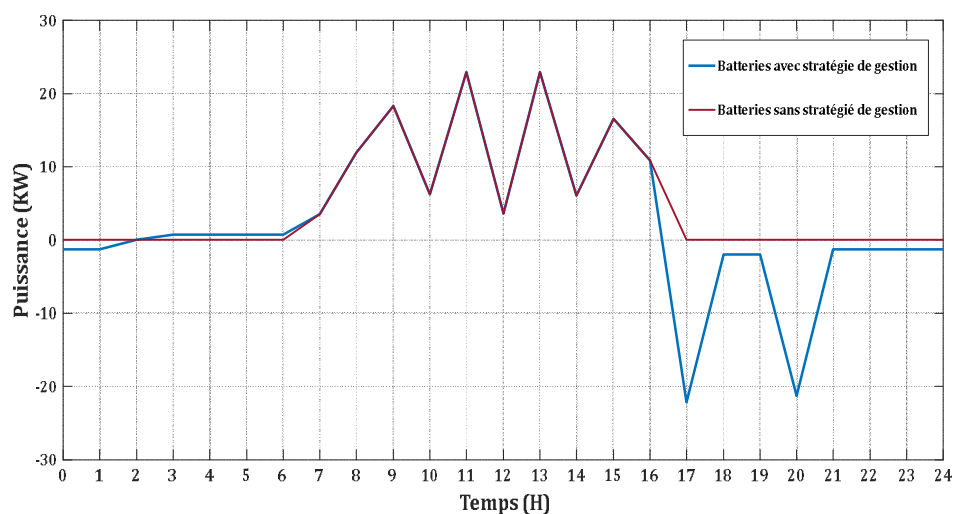


Figure IV.21: Courbes de puissance de les batteries avec et sans stratégie de gestion

La figure IV.21, représente les courbes de puissance des batteries dans le cas de présence et aussi d'absence de l'algorithme de gestion d'énergie.

Tableau IV.6 : Résultats obtenus du système (PV + GE + chargeur des VEs)

Paramètres	Avec stratégie de gestion	Sans stratégie de gestion
Diesel (L) (Pendant une année)	4562.50	12775
Durée de fonctionnement du GE par jour	5H/24H	14H/24H
CO ₂ (kg/an)	2553.50	7149.8
CO (kg/an)	4.11	11.51
PM (kg/an)	0.513	1.436
NO _x (kg/an)	40.77	114.16

Les résultats nous montrent que la topologie dotée d'un algorithme de gestion de l'énergie produite par le système d'alimentation PV/Diesel est plus rentable par rapport à la consommation du diesel, en sollicitant les batteries en cas de besoin. La stratégie de gestion réduit l'émission du carbone dioxyde et plusieurs autres types de gaz qui nuisent à l'environnement (voir le tableau IV.6).

IV.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un algorithme de commande afin d'améliorer l'efficacité énergétique du système d'approvisionnement en énergie d'un site de télécommunications. L'algorithme contribue à améliorer l'efficacité énergétique en régulant l'approvisionnement en énergie de notre système en fixant des priorités dans les modes d'approvisionnement en énergie électrique, en tenant compte de la fourniture d'énergie électrique au moindre coût et en tenant compte de la continuité d'alimentation de notre système en l'énergie quelles que soient les conditions et les scénarios. Il s'agit de mettre toutes les hypothèses et les obstacles possibles qui conduisent au manque d'énergie pour notre système.

Les résultats obtenus suite aux différents tests effectués sur le site de télécommunications prouvent le bon fonctionnement du système. Le site et les véhicules sont alimentés sans rupture.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse contribue au développement des contrôles pour la gestion d'énergie dans les sites de télécommunications isolés. Ces derniers imposent une alimentation électrique permanente et sans interruption afin de satisfaire les exigences des clients du secteur de télécommunications. D'autre part, l'alimentation en énergie de ce genre d'installations reste toujours un problème délicat, et le choix de cette énergie doit satisfaire simultanément les conditions économiques et techniques.

Nous nous sommes fixés comme objectif dans le présent travail, la combinaison de deux sources l'une renouvelables et l'autre fossile, pour apporter une amélioration dans le système énergétique d'un site de télécommunications isolé, que ce soit du point de vue énergie, fiabilité et autonomie de fonctionnement et préservation de l'environnement.

Le travail effectué a permis de faire une étude détaillée pour la mise en place d'un système énergétique hybride PV/diesel. La conception améliorée et novatrice que nous avons proposé permettra de réduire les coûts liés à l'extension des réseaux mobiles vers des zones isolées qui ne sont pas raccordées au réseau électrique. Pour ce faire, nous avons apporté une attention particulière à l'élaboration des profils de production en fonction des besoins énergétiques de la station, et à la détermination de la puissance des panneaux photovoltaïques et bien sur au choix optimal des composants du système.

Un algorithme de contrôle a été développé pour l'extraction de la puissance maximale du panneau photovoltaïque, et pour superviser l'écoulement de puissance entre les deux générateurs PV/diesel en fonction de la charge demandée tout en assurant un démarrage et un arrêt sécuritaire pour le groupe électrogène. La séquence de démarrage et d'arrêt vise à prolonger la durée de vie de ce dernier. Le superviseur de gestion de l'écoulement de puissance pour les topologies présentées est développé pour minimiser l'utilisation du générateur diesel, protéger la batterie contre la sous-charge et la surcharge, prolonger la durée de vie des éléments du système et réduire la consommation du carburant. Dans ce cadre, l'utilisation du logiciel Homer nous a permis de choisir la meilleure architecture ainsi que le type de la batterie le plus adéquat pour notre système. Grâce à ce logiciel, on a pu comparer plusieurs configurations par rapport au prix du kilowattheure, l'émission des gaz, l'autonomie et surtout la quantité du diesel

consommé par année. La performance du superviseur de gestion de puissance a été testée sous différentes conditions météorologiques (présence ou absence de production PV).

La méthode de dimensionnement et d'optimisation utilisée, basée sur le concept d'utilisabilité horaire, est simple et très précise, ce qui permet d'atteindre l'équilibre parfait entre l'offre et la demande en énergie électrique. Cette méthode s'avère très utile pour dimensionner un système hybride (PV/groupe électrogène) autonome dans une zone isolée.

Finalement, le système a été testé et validé sous MATLAB et les résultats analysés prouvent la performance du système proposé.

Perspectives

Un système de prédiction des défaillances pourrait être utilisé. L'intégration d'un système de suivi de l'angle des radiations du soleil est envisagée pour optimiser la disponibilité de la puissance sur la surface du panneau solaire. Une configuration expérimentale est nécessaire pour permettre aux chercheurs d'améliorer les résultats.

Annexes

Annexe « A »

Fiche technique du panneau PV : « VSG 580 » du fabricant Ertex Solar



Layout

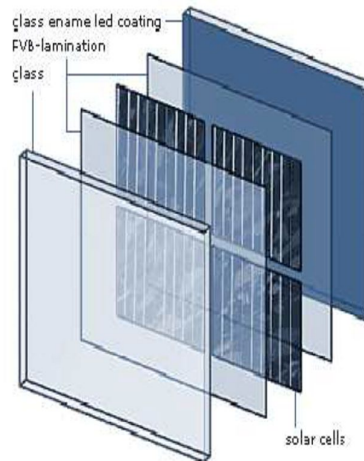
Front side: ESG-white glass

Cell type poly- or monocrystalline solar cells, type 156 x 156 mm

Cell embedding: PVB-lamination (Polyvinylbutyral)

Rear side: ESG-Glass

With an enamel coating **Junctions:** Junction box along the glass edge with connection assembly and 4 mm² junction cable appropriate to the module width



Type / Identification VSG-P 580

- **Rated output** P_{mpp} for 1000 W/m² 580 Wp
- **Rated output** P_{mpp} for 700 W/m² 408 Wp
- **Rated output** P_{mpp} for 500 W/m² 292 Wp
- **Cells per module** 160 pcs.
- **Glass thickness** 2 x 5 mm
- **Rated voltage** U_{mpp} 79,11 V
- **Rated current** I_{mpp} 7,33 A
- **Open circuit voltage** U_{OC} 98,73 V
- **Short circuit current** I_{OC} 7,81 A
- **Dimensions of the laminate (frameless)**
- **Height** 2631 mm
- **Width** 1655 mm
- **Weight** 117 kg

At STC (AM 1,5; 1000 W/m²; 25 °C); power output data ±3 %

Annexe « B »

Fiche technique de batterie : UCG 275-12 12V 275AH



Part Number: UCG275-12

Length: 522 ± 2 mm

Width: 268 ± 2 mm

Container Height: 220 ± 2 mm

Total Height (with terminal): 226 ± 2 mm

Approx Weight: Approx 73.0kg

Nominal Voltage: 12V

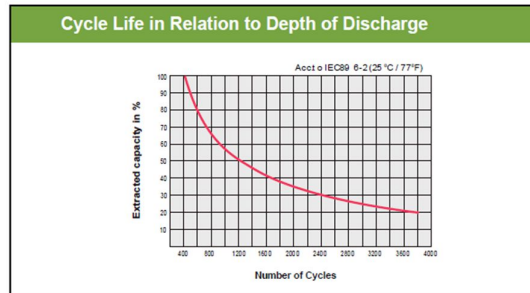
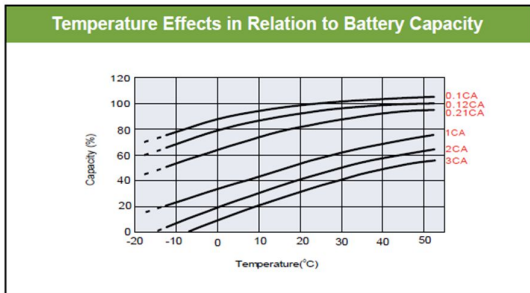
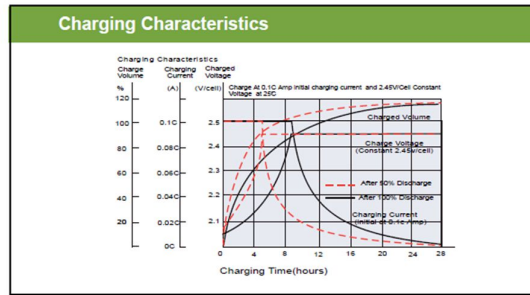
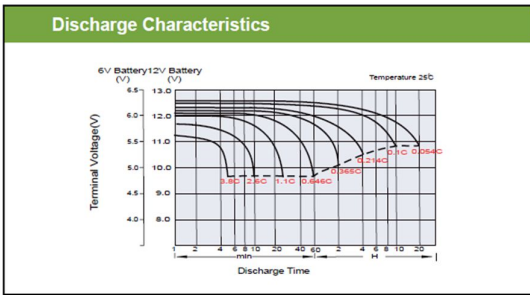


Constant Current Discharge (Amperes) at 25°C (77°F)														
F.V/Time	10min	15min	20min	30min	45min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.85V/cell	366.0	308.0	269.1	193.7	153.8	124.8	77.5	60.5	49.0	39.8	34.7	28.3	23.6	13.3
1.80V/cell	467.7	372.1	318.1	228.5	178.9	139.8	84.6	65.1	52.3	42.7	37.2	30.1	25.0	13.4
1.75V/cell	/	406.5	342.2	237.2	185.7	146.3	87.8	66.3	53.5	43.9	38.3	30.6	25.3	13.5
1.70V/cell	/	434.0	359.7	246.9	193.1	150.9	91.3	68.1	54.9	45.0	39.1	31.0	25.5	13.8
1.65V/cell	/	461.5	382.1	260.5	197.9	156.0	93.8	71.0	56.8	46.2	39.9	31.5	26.0	14.0
1.60V/cell	/	/	407.0	275.0	206.3	161.5	97.0	73.2	58.6	47.7	40.8	31.8	26.3	14.1

Constant Power Discharge (Watts) at 25°C (77°F)														
F.V/Time	10min	15min	20min	30min	45min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.85V/cell	682.9	580.6	512.9	372.1	297.6	242.3	151.1	118.1	95.9	78.2	68.6	56.1	46.7	26.6
1.80V/cell	861.0	691.1	597.1	433.8	343.2	269.8	163.9	126.5	101.9	83.7	73.3	59.4	49.5	26.8
1.75V/cell	/	747.7	637.0	448.1	354.5	281.2	169.5	128.4	104.0	85.7	75.2	60.3	49.9	27.0
1.70V/cell	/	792.4	665.6	464.6	367.6	289.3	175.8	131.7	106.5	87.6	76.6	61.1	50.4	27.5
1.65V/cell	/	837.1	703.8	487.9	375.4	298.1	180.2	137.0	109.9	90.0	78.2	62.0	51.4	27.8
1.60V/cell	/	/	742.0	510.1	387.7	306.2	185.1	140.5	112.9	92.5	79.7	62.6	51.9	27.9

	Capacity affected by Temperature	40°C (104°F) 103%
		25°C (77°F) 100%
		0°C (32°F) 86%
Design Floating Life at 20°C	15 Years	
Self Discharge	Ultracell batteries may be stored for up to 6 months at 25°C(77°F) and then a refresh charge is required. For higher temperatures the time interval will be shorter.	

Terminal Type: Standard Terminal F11



Self Discharge Characteristics

Remaining Capacity (%)
Storage Time (Months)

A	No supplementary charge required (Carry out supplementary charge before use if 100% capacity is required.)
B	Supplementary charge required before use. Optional charging way as below: 1. Charged for above 3 days at limited current 0.25CA and constant voltage 2.25V/cell. 2. Charged for above 20hours at limited current 0.25CA and constant voltage 2.45V/cell. 3. Charged for 8-10hours at limited current 0.05CA.
C	Supplementary charge may often fail to recover the capacity. The battery should never be left standing till this is reached.

Ultracell (UK) Ltd | Vesty Business Park | Vesty Road | Liverpool | L30 1NY | United Kingdom
Tel: +44 (0) 151 523 2777 Fax: +44 (0) 151 523 0855 Email: info@ultracell.co.uk
www.ultracell.co.uk

ALL DATA IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE



Annexe « C »

Fiche technique du groupe électrogène : 6.5 - 7.1 kVA, 50 Hz | HYW-6 T6

Caractéristiques

- Motorisation :

diesel

- Option et accessoire :

insonorisé

Description

Puissance nominale :6.6KW prp ;7.3KWstandby

Fabricant : YANMAR

Modèle :3TNM68 GHFCG

Type de moteur : Diesel 4 temps

Type d'injection :Indirecte

Type d'aspiration :Naturel

Régulation mécanique

Filtre à air sec

Protection des parties chaudes

Protection des parties mobiles

Cylindres, nombre et disposition :36L

Alésage x course :68 x 72mm

Cylindrée totale :0,784 L

Système de réfrigération :Liquide de refroidissement

Spécification de l'huile moteur :SAE 3 class 10W30/API grade CD,CF

Consommation carburant Stand-by :2,29 l/h

Consommation carburant à 100 % PRP :2,08 l/h



Consommation carburant à 75 % PRP :1,65 l/h

Consommation carburant à 50 % PRP :1,29 l/h

Consommation carburant à 25 % PRP :0,85 l/h

Consommation d'huile à pleine charge : 0,28 g/kwh

Quantité d'huile maximum :2.5 L

Régulateur Type Mécanique

Filtre à air Type Sec

Diamètre intérieur de tuyau d'échappement :40mm

Moteur Diesel

4 temps

Refroidi par eau

Démarrage électrique 12V

Radiateur avec ventilateur de soufflage

Filtre décanteur (niveau visible)

Annexe « D »

Fiche technique du l'Onduleur Chargeur XPC 2200-48



Modèle	XPC 1400-12	XPC 2200-24	XPC 2200-48
Onduleur			
Tension nominale de la batterie	12 Vdc	24 Vdc	48 Vdc
Plage de tension d'entrée	9.5 – 16 Vdc	19 - 32 Vdc	38 - 64 Vdc
Puissance continue @ 25°C	1100 VA	1600 VA	1600 VA
Puissance 30 min. @ 25°C	1400 VA	2200 VA	2200 VA
Puissance 5 sec. @ 25°C		3 x Phom	
Puissance maximale		Jusqu'au court circuit	
Charge asymétrique		Jusqu'à Pcont.	
Détection de charge (stand-by)		1 à 25 W	
Cos φ		0.1 - 1	
Rendement max.	94 %		95 %
Puissance à vide OFF/Stand-by/ON	0.5 / 0.6 / 4 W	0.8 / 0.9 / 7 W	1.2 / 1.3 / 7 W
Tension de sortie		230 Vac (±5 %) (XPC disponibles aussi en 120 Vac)	
Fréquence de sortie		50 Hz ±0.05 % (contrôlée par quartz)	
Distorsion harmonique	< 4 %		< 2 %
Protection de surcharge et de court-circuit		Déconnexion automatique puis 3 essais de démarrage	
Protection de surchauffe		Alarme acoustique avant coupure et redémarrage autom.	
Chargeur de batterie (4 étages) I-U-Uo-Égalisation (chaque 25 cycles)			
Courant de charge réglable	0 - 45 Adc	0 - 37 Adc	0 - 20 Adc
Répartiteur de courant d'entrée		Non disponible	
Tension maximum d'entrée		265 Vac	
Plage d'entrée tension AC		Niveau de détection réglable de 150 à 230 Vac (XPC disponibles aussi en 120Vac)	
Fréquence d'entrée admissible		45 - 65 Hz	
Correction du facteur de puissance (PFC)		EN 61000-3-2	
Contrôle de la batterie (seuils et durées modifiables par l'utilisateur)			
Durée d'absorption		0-4 h	
Tension d'absorption*	14.4 Vdc	28.8 Vdc	57.6 Vdc
Tension de maintien*	13.6 Vdc	27.2 Vdc	54.4 Vdc
Durée d'égalisation*		0-4 h	
Tension d'égalisation*	15.6 Vdc	31.2 Vdc	62.4 Vdc
Protection contre la décharge*	10.8 Vdc	21.6 Vdc	43.2 Vdc
Compensation de la température (option CT-35)		-3 mV / ° C / cellule	
Données générales			
Contact multifonctionnel programmable		16 A - 250 Vac (libre de potentiel 3 points)	
Courant max. du relais de transfert		16 Aac	
Temps de commutation du relais de transfert		< 20 ms	
Poids	11.7 kg		12.6 kg
Dimensions h/L [mm]		124 / 215 / 410	
Indice de protection		IP20 (IP22 avec capot C-IP22)	
Certificat ECE-R 10 (E24)	•	•	Non disponible
Déclaration UE de conformité		Directive Basse Tension 2014/35/UE: EN 50178:1997 Directive de Compatibilité Electromagnétique (CEM) 2014/30/UE: - EN 62040-2:2006, EN 61000-3-2:2014	
Plage de température de travail		-20 à 55 °C	
Humidité relative de fonctionnement		95 % sans condensation	
Ventilation		Dès 45 °C	
Niveau acoustique		< 40 dB / < 45 dB (sans/avec ventilation)	
Garantie		5 ans	
Certification ISO		9001:2008 / 14001:2004	
Option régulateur de charge solaire (4 étages)			
Tension max. du générateur PV (Uoc)	25 Vdc	45 Vdc	90 Vdc
Courant max. du générateur PV (Isc)	30 Adc	30 Adc	20 Adc
Courbe de charge		I-U-Uo-Égalisation (chaque 25 cycles)	

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Julien Delmas « Les relais GSM » Mai 2006 – © J.D.
- [2] Mdahsaulhoque, Ahmad kaal Hassan, « Modeling and performance optimization of automated antenna alignment for telecommunication transceivers », engineering science and technology an international journal in press.2015.
- [3] Mohammed H Alsharif, « Comparative Analysis of Solar-Powered Base Stations for Green Mobile Networks » *Energies* 10, 8 (2017), 1208.
- [4] Ani Vincent Anayochukwu and Emetu Alice Nnene, « Simulation and optimization of hybrid diesel power generation system for GSM base stationsite in Nigeria », *Electronic Journal of Energy & Environment* 1, 1 (2013), 37–56.
- [5] «Green Power for Mobile: Top ten findings», Association GSM, 2009.
- [6] Idda, A., Slimani, M.E., Bentouba, S., «Hammaoui, Y., Different PV System Configurations for UninterruptiblePower Supply (UPS): Application to GSM Relay », *Journal of Advanced Research in Science and Technology*, 4 (2017), 574-582.
- [7] Albert Ayang, Paul-Salomon Ngohe-Ekam, BossouVideme, and Jean Temga, « Power Consumption: Base Stations of Telecommunication in Sahel Zone of Cameroon: Typology Based on the Power Consumption—Model and Energy Savings », *Journal of Energy* Volume 2016, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3161060>.
- [8] Charles Cuvellez, Ecole polytechnique de Bruxelles, Université de Bruxelles.
- [9] Vincent Anayochukwu Ani and Emmanuel Onyeka Ani, « Simulation of Solar Photovoltaic Hybrid Power Generation System with Energy Storage and Supervisory Control for Base Transceiver Station (BTS) Site Located in Rural Nigeria », *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 4, 1 (2014), 23–30.
- [10] Melle BAGHDADI Fazia « Modélisation Et Simulation Des Performances D'une Installation Hybride De Conversion D'énergies Renouvelables » Mémoire de Magister / l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 26/09/2011.
- [11] B. Flèche - D. Delagnes « Production d'énergie électrique : énergie solaire photovoltaïque » juin 2007.
- [12] Melle BRIHMAT Fouzia « L'Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien » Mémoire de Magister / l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 03/07/2012.
- [13] Cécile Miquel « Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental » la direction de Bruno Gaidon /Juillet 2009.

- [14] Direction générale Énergie « Système de télécommunications du Gros Bessillon alimenté par système hybride PV-Diesel » France Telecom - CNET/PAB/STC/ESA/ 1993.
- [15] H. ZERAÏA - BENYAHIA, A. MALEK et M. BELHAMEL « Téléphonie Rurale Alimentée par Energie Electrique d'Origine Photovoltaïque » Centre de Développement des Energies Renouvelables Bouzaréah, Alger [Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999)].
- [16] Mme ZERAÏA Hassiba née Benyahi « optimisation des générateurs électriques d'énergies renouvelables alimentant les systèmes de télécommunications radioélectriques » Mémoire de Magister en Automatique, le 03/11/2004.
- [17] Eric MICHEL, Arnaud DEVES « Énergie photovoltaïque : Application au traitement de l'eau potable et des eaux usées en zones rurales » FNDAE n°12 Document technique Réédition 2003.
- [18] Haizea Gaztañaga Arantzamendi, « Etude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux micro-réseaux », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, France.2015.
- [19] H. Haas, J.S. Thompson, I. Ku, Cheng-Xiang Wang, Tuan Anh Le, M.R. Nakhai, Jiayi Zhang, and L. « Hanzo. Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks » IEEE Communications.
- [20] Miguel LOPEZ, « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », thèse de doctorat
- [21] A. El Khadimi et al., « Dimensionnement et Optimisation Technico-économique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque - Eolien avec Système de Stockage » Rev. Energ. Ren. Vol. 7 (2004) 73.
- [22] Pierre Mayé, « Aide-mémoire Electrotechnique », Dunod, Paris, 2006.
- [23] « Groupe électrogène, le guide pratique », publié par ooreka. <http://groupeelectrogene.comprendrechoisir.com/chapitre/597>.
- [24] N. Balbheem and S. Patil Kulkarni, « Exploring the Performance Extents of Hybrid Renewable Energy Systems », International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, vol. 3, no. 2, pp. 1212-1222, 2017.
- [25] Mehreen Gul, Mehreen Gul, Yash Kotak, Tariq Muneer, « Review on recent trend of solar photovoltaic technology, Exploration & Exploitation », vol. 34, no. 4, pp. 485-526, 2016

- logiciel HOMER' site officiel: www.homerenergy.com.
- [26] Peter J. Schubert, « Renewable Energy for Human Sustainability (Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science) Subject: Sustainability and Solutions, Online Publication, Apr 2016, pp 1–33.
- [27] P. Docampo, S. Guldin, T. Leijtens, N. K. Noel, U. Steiner, and H. J. Snaith, « Lessons Learned: From Dye-Sensitized Solar Cells to All-Solid-State Hybrid Devices », *Adv. Mater.* 2014, Wiley-VCH Verlag & Co., pp 1–18.
- [28] Le fichier de données du site est une station BTS, propriété de l'un des opérateurs de réseaux de téléphonie mobile algériens <http://www.alger-city.com/economie/operateurs-telephoniques>, (2020).
- [29] D. Rekioua, Z. Roumila et T. Rekioua, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien - diesel », Université A. Mira, Bejaia. Bejaia, Algérie 2008.
- [30] Nahid-Al-Masood, Rifat Mirza, Jubaer Ahmed, « Design of a Cost Effective Off-Grid Wind-Diesel Hybrid Power System in an Island of Bangladesh », *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011.
- [31] National Renewable Energy Laboratory' Site official: www.nrel.gov.
- [32] P.A. Stott and M.A. Mueller, « Modelling fully variable speed hybrid wind diesel systems », *UPEC'06*, vol 1, pp-212-216, Newcastle USA, Sep 2006.
- [33] Azah, M., Tamer, k., « Design of Hybrid PV/Diesel Generator Systems at Minimum Cost: Case study for kuching, Malaysia, Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D) », *IEEE PES, Orlando, FL*, (2012), 1-6.
- [34] Joséanne Bélanger-Gravel, « Analyse technico-économique d'un système hybride éolien photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls », *Mémoire de maîtrise en génie métallurgique, université de Montréal, Canada*, 2011.
- [35] Gourbi, A., Bousmaha, I., Brahmi, M., Tilmatine, A., « Numerical study of hybrid photovoltaic Power supply system », *Journal of power Technologies*, 96 (2016), No.2, 137-144.
- [36] Dekker, J., Nthonotho, M., Chowdhury, S., « Economic analysis of PV/diesel hybrid power systems in different climatic zones of South Africa », *Electrical Power and Energy Systems*, 40 (2012), 104-112.

- [37] Ying-Yi, H., Yuan-Ming, L., Yung-Ruei, C., Yih-Der, L., and Pang-Wei, L., « Optimization Capacities of Distributed Generation and Energy Storage in a Small Autonomous Power System Considering Uncertainty in Renewables », *Energies*, 8 (2015), No.4, 2473-2492.
- [38] Jacobus, H., « Evaluating the impact of adding energy storage on the performance of a hybrid power system », *Energy Conversion and Management*, 334 (2011), 928-935.
- [39] Phuangpornpitak, N., Kumar, S., « PV hybrid systems for rural electrification in Thailand », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (2007), No.7, 1530-1543.
- [40] Deshmukha, MK., and Deshmukh, SS., « Modeling of hybrid renewable energy systems », *Renewable and Sustainable Energy Review*, 12 (2008), No.1, 235-249.
- [41] Mondal, A.H., Manfred, D., « Hybrid systems for decentralized power generation in Bangladesh », *Energy for Sustainable Development*, 14 (2010), 48-55.
- [42] Pirhaghshenasvali, M., Behzad, A., « Optimal modeling and sizing of a practical hybrid wind/PV/diesel generation system », *The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, (2014).
- [43] Yahiaoui, A., Benmansour, K., Tadjine, M., « A new sizing algorithm of renewable hybrid systems PV-diesel generator-battery: Application to the case of Djanet city of Algeria, 8th International Conference on Modelling », *Identification and Control (ICMIC)*, (2016)
- [44] Samer, R., « Contribution to the modelling of reversible electrolyser and hydrogen fuel cell systems for coupling to photovoltaic generators », PhD thesis, University of Toulouse, France, 42 (2008), No.8, 183
- [45] Samantha LACROIX. « Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries », thèse de doctorat, école doctorale, Paris, France, 2013
- [46] Bertrand CHAUCHAT. « Chargeur de batteries intégré pour véhicule électrique », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, France, 1997
- [47] Harun TURKER. « Véhicules Electriques Hybrides Rechargeables, Evaluation des Impacts sur le Réseau Electrique et Stratégies Optimales de Recharge », thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2012
- [48] Jean Syrota, P. Hirtzman, D. Auverlot, "La voiture de demain : carburants et électricité", Centre d'analyse stratégique, Rapport & Document, juin 2011

- [49] A. BURKE, « Ultracapacitor Technologies and Application in Hybrid and Electric Vehicles », International Journal of Energy Research, June 2009
- [50] B. DESTRAZ, « Assistance énergétique à base de super-condensateurs pour véhicules à propulsion électrique et hybride », Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne 2008
- [51] Ahmed BOUCHERIT, « Conception d'un convertisseur de puissance pour les véhicules électriques multi-sources », thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort Montbéliard, France, 2011
- [52] Adrian FLORESCU. « Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique », thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2012
- [53] Kevin Tanguy, « Modélisation et optimisation de la recharge bidirectionnelle de véhicules électriques Application à la régulation électrique d'un complexe immobilier », Québec, Canada, 2013
- [54] Ike, Dike U., Adoghe, Anthony U., Ademola, A., « Analysis of Telecom Base Stations Powered by Solar Energy », International journal of scientific & technology research, 3 (2014), 369-374
- [55] Idda, A., Slimani, M.E., Bentouba, S., Hammaoui, Y., « Different PV System Configurations for Uninterruptible Power Supply (UPS): Application to GSM Relay », Journal of Advanced Research in Science and Technology, 4 (2017), 574-582
- [56] Notton, G., Muselli, M., and Louche, A., « Autonomous hybrid photovoltaic power plant using a back-up generator: a case study in a Mediterranean Island », Renewable Energy, 7 (1996), No.4, 371-391
- [57] Rekioua, Djamila, Matagne, Ernest, « Optimization of photovoltaic power systems: Modelization, simulation and Control », Green Energy and Technology Series, Springer, (2012)
- [58] El Khadimi, A., Bchir, L., Zeroual, A., « Dimensioning and optimisation technico-economic to a system of energy photovoltaic hybrid wind - with the Storage System », Rev. Energ. Ren, 7 (2004), 73-83
- [59] Abdallah Mougay, Mohamed Khatir, Mohamed Flitti, Sid-Ahmed Zidi, Ahmed Ganoune., « Energy management for a new power system configuration of base transceiver station

(BTS) destined to remote and isolated areas », *Przegląd Elektrotechniczny*, 2021, Vol. 21, No. 8 , pp : 01-08

- [60] Shaahid, S.M., El-Amin, I., Rehman, S., Al-Shehri, A., Ahmad, F., Bakashwain, J., Al-Hadhrami, Luai M., « Techno-Economic Potential of Retrofitting Diesel Power Systems with Hybrid Wind-Photovoltaic-Diesel Systems for Off-Grid Electrification of Remote Villages of Saudi Arabia, *International Journal of Green Energy* », 7 (2010), No.6, 632-646
- [61] Data file from the site is a BTS station, owned by one of the Algerian cell phone network operators: <http://www.alger-city.com/economie/operateurs-telephoniques>, (2020)

Intitulé de la thèse : « Gestion de l'énergie dans un système d'alimentation multi-sources photovoltaïque/groupe électrogène destiné à un site de télécommunications isolé »

Résumé

Jusqu'à présent, la majorité des sites de télécommunications isolés en Algérie sont alimentés exclusivement par des générateurs diesel. Cette source de production présente plusieurs inconvénients tels que l'émission de gaz à effet de serre, le prix des combustibles ainsi que la pollution. L'emplacement des sites isolés ainsi que leurs caractéristiques géographiques et climatiques justifient leur isolation du réseau principale. Malgré ces inconvénients, le générateur diesel a été le plus utilisé compte tenu de sa disponibilité et de sa fiabilité. Ainsi la combinaison des sources d'énergies renouvelables avec le générateur diesel aurait un impact positif sur l'environnement et le coût de la production de l'énergie. Néanmoins, cette solution nécessite des algorithmes de contrôle assez sophistiqués, car les différentes sources d'énergie fonctionnent en parallèle. Dans ce travail, le système étudié se compose d'un générateur diesel, un système de stockage et un générateur photovoltaïque. Une stratégie de gestion de puissance entre les différents générateurs a été utilisée, pour atteindre de hautes performances de gestion de l'énergie. Un algorithme de contrôle a été développé pour gérer l'écoulement de puissance entre les différents éléments du système, tout en réduisant l'utilisation des générateurs diesel. Une nouvelle configuration du système d'alimentation du site isolé a été proposée pour compenser les dépenses entraînées par l'installation du générateur PV. La performance du système proposé a été testée et validée en utilisant HOMER et MATLAB.

Mots-clés : Gestion de l'énergie, Système hybride, Station de base (BTS), Système photovoltaïque, Générateur diesel, Véhicule électrique.

ملخص

حتى الآن ، غلبية مواقع الاتصالات المعزولة في الجزائر تعمل بشكل حصري بمولدات الديزل. مصدر الإنتاج هذا له عيوب عديدة مثل انبعاث غازات الاحتباس الحراري وأسعار الوقود والتلوث. موقع المواقع المعزولة وكذا خصائصها الجغرافية والمناخية تبرر عزلها عن الشبكة الكهربائية. على الرغم من هذه العيوب ، فقد تم استخدام مولد الديزل أكثر من غيره نظرًا لتوافره وموثوقيته. وبالتالي فإن الجمع بين مصادر الطاقة المتجددة ومولد الديزل سيكون له تأثير إيجابي على البيئة وتكلفة إنتاج الطاقة. ومع ذلك ، يتطلب هذا الحل خوارزميات تحكم معقدة للغاية ، حيث تعمل مصادر الطاقة المختلفة بالتوازي. في هذا العمل ، يتكون النظام المدروس من مولد ديزل ونظام تخزين ومولد ضوئي. تم استخدام إستراتيجية إدارة الطاقة بين المولدات المختلفة لتحقيق أداء عالٍ في إدارة الطاقة. بالإضافة إلى ذلك تم تطوير خوارزمية تحكم لإدارة تدفق الطاقة بين العناصر المختلفة للنظام ، مع تقليل استخدام مولدات الديزل. تم اقتراح تكوين جديد لنظام الطاقة في الموقع المعزول للتعويض عن النفقات التي تكبدها تركيب المولد الكهروضوئي. تم اختبار أداء النظام المقترح والتحقق من صحته باستخدام برنامج الهومر وبرنامج ماتلاب.

الكلمات المفتاحية: إدارة الطاقة ، النظام الهجين ، المحطة الأساسية (BTS) ، النظام الكهروضوئي ، مولد الديزل ، المركبات الكهربائية.

Abstract

Until now, the majority of remote telecommunications sites in Algeria are powered exclusively by diesel generators. This source of production has several disadvantages such as the emission of greenhouse gases, the price of fuels and pollution. The location of isolated sites as well as their geographical and climatic characteristics justify their isolation from the main network. Despite these disadvantages, the diesel generator has been used the most given its availability and reliability. Thus the combination of renewable energy sources with the diesel generator would have a positive impact on the environment and the cost of energy production. However, this solution requires quite sophisticated control algorithms, since the different energy sources operate in parallel. In this work, the studied system consists of a diesel generator, a storage system and a photovoltaic generator. A power management strategy between the different generators has been used, to achieve high energy management performance. A control algorithm has been developed to manage the flow of power between the different elements of the system, while reducing the use of diesel generators. A new configuration of the isolated site power system was proposed to compensate for the expenses incurred by the installation of the PV generator. The performance of the proposed system has been tested and validated using HOMER and MATLAB.

Keywords : Energy management, Hybrid system, Base station (BTS), Photovoltaic system, Diesel generator, Electric vehicle.