

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique

Thème

**ETUDE D'UN SYSTEME HYBRIDE POUR
L'ALIMENTATION D'UN HABITAT**

Réalisé par :

DAHOU Meroua

Jury :

BOUARAOUR Kamel	Maître de conférences B	Université de Ghardaïa	Président
Dr. TOUAFEK Khaled	Maître de Recherche A	URAER Ghardaïa	Encadreur
ARIF Mohammed	Maître assistant A	Université de Ghardaïa	Examineur
AKERMI Faouzi	Maître assistant A	Université de Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2015/2016

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes chère parents symboles de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que Dieu les protègent pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie.

Mes chers frères;

Ma sœur;

Ma famille ;

Mes enseignants depuis mon enfance ;

Mes amis (es) et mes collègues.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce mémoire ;

A ceux qui me sont chère et ceux que j'ai aimé du fond de mon cœur.

Dahou Meroua.

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir accordé La santé, le courage et, les moyens pour suivre nos études et la volonté, la patience et la chance pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur Dr TOUAFEK Khaled, mon Encadreur qui n'a pas lésiné sur les moyens et sur son temps pour m'apporter son aide précieuse et qui m'a permis de mener à bien ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur DR KAMAL BOUAROUR, Maitre de conférences et doyen de la faculté de science et technologie à l'université de Ghardaïa, d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.

Je remercie Monsieur ARIF Mohamed, enseignant au département de science et technologie à l'université de Ghardaïa d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont aussi à tous mes enseignants du Département des sciences

Et Technologie, particulièrement les enseignants de Master Automatique

Mon tenon à remercier :

Mon cher papa A celui qui a été toujours Mon support dans cette vie celui qui me donne le courage éclatant pour continuer à chaque fois que j'ai l'impression de reculer

Beaucoup ma chère et tendre mère, source d'affection de courage et d'inspiration qui a autant sacrifié pour me voir atteindre ce jour.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues particulièrement

Mes proche amis Ouled yahia. Y, Taled Ahmed. A, Guendouz. A F, qui a contribué de près à la réalisation de ce travail, sans oublier ma promotion de l'année 2015 surtout les proches

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : modules photovoltaïques.....	6
Figure I.2 : Eolienne à axe horizontal.....	7
Figure I.3 : système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents.....	8
Figure I.4 : piles à combustibles.....	10
Figure I.5 : Configuration du générateur diesel.....	10
Figure I.6 : Schéma synoptique de système de commande et supervision.....	13
Figure I.7 : Schéma de principe d'un hacheur : (a) abaisseur (b) élévateur.....	14
Figure I.8 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension.....	15
Figure I.9 : Redresseurs triphasés : (a) P3, (b) PD3, (c) S3.....	17
Figure I.10 : Architecture des SEH.....	18
Figure I.11 : Solaire-éolien, stockage à batteries, installation isolée.....	19
Figure I.12 : solaire-éolien, batteries de stockage et hydrogène, installation isolée.....	20
Figure I.13 : Solaire-éolien, stockage à hydrogène, installation isolée.....	20
Figure I.14 : Eolien, stockage à hydrogène et par super condensateurs, installation isolée...	20
Figure I.15 : Eolien-diesel, stockage à hydrogène, installation isolée.....	21
Figure I.16 : petits systèmes de puissance CA avec composants couplés du côté CC.....	22
Figure I.17 : Configuration du SEH à bas CC.....	23
Figure I.18 : Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA.....	24
Figure I.19 : Configuration de bus CA.....	26
Figure I.20 : Courbe du rendement d'un moteur diesel ayant une puissance nominale de 75 KW.....	27

Chapitre II

Figure II.1 : (a) consommation finale par secteur d'activité ; (b) consommation du secteur résidentiel par type d'énergie.....	35
Figure II.2 : bilan des émissions de co2 par secteur.....	36
Figure II.3 : La production d'eau chaude sanitaire.....	42
Figure II.4 : Le «ballon» est installé à l'intérieur de la maison. Il sert à stocker l'eau chauffée par les capteurs. Ces deux éléments sont reliés par un circuit hydraulique.....	42
Figure II.5 : Les «capteurs» sont posés dehors et permettent de capter la chaleur du rayonnement solaire afin de chauffer l'eau.....	42

Figure II.6: Profils de consommation journaliers établis pour l’habitat résidentiel considéré en fonction de l’heure et de la saison.....	46
Figure II.7: Profils de consommation journalière de base enregistrés dans l’habitat résidentiel en fonction du temps.....	47
Figure II.8 : Allure de l’évolution de la consommation électrique en fonction des mois représentée par les facteurs de correction de la charge électrique par rapport au mois de juin.....	48
 Chapitre III :	
Figure III.1: Schéma physique de la chaîne de conversion d’énergie électrique hybride (photovoltaïque- éolienne- groupe électrogène).....	51
Figure III.2: Schéma d’une installation type d’un système hybride (PV-éolienne-groupe diesel).....	52
Figure III.3: Spectre de rayonnement solaire.....	54
Figure III.4: Schéma électrique équivalent d’une cellule photovoltaïque.....	55
Figure III.5: Modèle de la voile.....	59
Figure III.6: Configuration du moteur diesel.....	60
Figure III.7: Modèle électrique de la batterie.....	63
Figure III.8: Classification des systèmes d’énergie hybrides.....	64
Figure III.9 : Schéma de simulation du système hybride.....	67
Figure III.10 : Schéma de simulation du gestionnaire.....	68
 Chapitre IV	
Figure IV.1 : Configuration d’un SH à bus CC.....	72
Figure IV.2 : Configuration du SH à deux bus à CC et à CA.....	73
Figure IV.3 : irradiation globale, diffuse, directe normale et globale inclinée collecté par la station radiométrique.....	77
Figure IV.4 : Evolutions temporelles de la température ambiante, et du rayonnement solaire globale.....	79
Figure IV.5 : Architecture d’un système hybride.....	80
Figure IV.6 : Résultat de simulation de système hybride par HOMER.....	80
Figure IV.7 : Puissance moyenne produite par chaque source.....	81
Figure IV.8 : DMAP de production horaire par le GP.....	83

Figure IV.9 : DMAP de production horaire par l'éolien.....	84
Figure IV.10 : Dmap de production horaire par le GD pour un système éolien-PV-diesel.....	86
Figure IV.11 : Dmap de production horaire par le GD pour un système éolien-diesel.....	86
Figure IV.12 : Dmap de production horaire par le GD pour un système PV-diesel.....	86
Figure IV.13 : Système hybride éolien diesel.....	88
Figure IV.14 : Puissance de la charge.....	88
Figure IV.15 : Puissance de charge et de SHED.....	88
Figure IV.16 : Vitesse de la GAS.....	89
Figure IV.17 : Vitesse du moteur diesel.....	89
Figure IV.18 : Fréquence du système hybride.....	89
Figure IV.19 : Puissance réactive générée GD.....	89
Figure IV.20 : Les tensions de la charge.....	89
Figure IV.21 : Zoom des tensions de la charge.....	89
Figure IV.22 : Les courants de charge.....	90
Figure IV.23 : Zoom des courants de charge.....	90
Figure IV.24 : Les courants de GD.....	90
Figure IV.25 : Zoom des courants de GD.....	90
Figure IV.26 : Les courants de l'éolienne.....	90
Figure IV.27 : Zoom des courants de l'éolienne.....	90

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : classification des SEH par gamme de puissance.....	4
---	----------

Chapitre II

Tableau II.1 : Facteurs de correction de la charge électrique par rapport au mois de juin...	48
---	-----------

Chapitre IV

Tableau IV.1 : profile de charge d'un habitat sélectionné.....	74
Tableau IV.2 : vitesses moyennes mensuelles du vent (m/s) enregistrées durant l'année 2009.....	76
Tableau IV.3 : Valeurs mensuelles et annuelles du rayonnement global (kWh/m ²) sur un plan horizontal.....	77
Tableau IV.4 : distribution du rayonnement global horaire (Wh/m ²) reçu sur un plan horizontal.....	78
Tableau IV.5 : Energie annuelle produite par chaque générateur.....	82
Tableau IV.6 : Information concernant la production d'énergie par le GP.....	82
Tableau IV.7 : Information concernant la production de l'énergie éolienne.....	84
Tableau IV.8 : Information concernant la production de l'énergie par le GD.....	85

Résumé

Les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles et fissiles : le gaz à effet de serre. Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies. Le but du travail présenté dans ce mémoire, est l'étude des systèmes hybrides de génération de l'énergie électrique pour l'alimentation des sites isolés, avec comme objectif de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal de systèmes hybrides afin de réduire les émissions des gaz à effets serre.

Mots clés : énergies renouvelables, systèmes hybrides.

Abstract

Renewables energies appear today and long term as the right solution that covers the energy requirement by decreasing the major drawback from fossil and fissile energy: greenhouse gas. They have become an essential form of energy for their flexibility, ease of use and multiplicity of areas of activity where they are expected to play a role. These modes of production and associated distribution means is caused to undergo profound changes over the coming decades. The object of the work presented in this thesis is the study of hybrid systems for generating electricity for powering remote sites with the objective of maintaining a high level of reliability with minimal cost through optimal dimensioning hybrid systems to reduce greenhouse gas Yaiza effects.

Key words: renewables energies, hybrid systems.

ملخص

ان الطاقة المتجددة تظهر اليوم وعلى المدى الطويل انها الحل المناسب الذي يغطي الاحتياجات من الطاقة من خلال خفض العيب الرئيسي من الطاقة الأحفورية والنووية من: غازات الدفيئة. فقد أصبحت شكلا أساسيا من أشكال الطاقة لمرونتها، وسهولة الاستخدام وتعدد مجالات النشاط حيث يتوقع أنها تلعب دورا فعالا في ذلك. ترتبط هذه الأنماط من توليد وتوزيع يعني تجميع للخضوع. تلحقها تبادل عميق على مدى العقود المقبلة. والهدف من العمل المقدم في هذه الأطروحة هو دراسة الأنظمة الهجينة لتوليد الكهرباء لتوفير الطاقة للمناطق النائية بهدف الحفاظ على مستوى عال من الموثوقية بأقل تكلفة ممكنة من خلال أنظمة ضبط أبعاد الهجين الأمثل للحد من الاحتباس الحراري و تأثير الغاز.

كلمات مفتاحية: طاقات متجددة، أنظمة هجينة.

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction Générale.....	01
Chapitre I	
Etat de l'art sur les systèmes d'énergie hybrides	
I.1 Introduction.....	03
I.2 L'origine de la notion du système.....	03
I.3 Définition et missions des systèmes hybrides.....	03
I.4 Principaux composants des systèmes hybrides.....	05
1.4.1 Le réseau électrique (réseau de distribution).....	05
I.4.2 Générateurs photovoltaïques.....	05
I.4.3 Eoliennes.....	07
I.4.4 Piles à combustibles.....	09
I.4.5 Générateur diesel.....	10
I.4.6 Systèmes de stockage.....	11
I.4.7 Systèmes supervision.....	11
I.4.8 Convertisseurs électrique.....	13
I.4.8.1 Les hacheurs (convertisseur DC/DC).....	13
I.4.8.2 Les onduleurs (convertisseur DC/AC).....	14
I.4.8.3 Les redresseurs (convertisseur AC/DC).....	16
I.4.9 Charges.....	17
I.5 Structure des systèmes de génération.....	17
I.6 Alimentation en énergie des régions éloignées de tout réseau.....	18
I.6.1 Les systèmes autonomes et isolés.....	18
I.6.2 Exemples de topologies de systèmes hybrides.....	19
I.7 Configuration de bus dans les systèmes hybrides.....	21
I.7.1 Architecture à bus CC.....	22
I.7.2 Architecture mixte à bus à CC/CA.....	23
I.7.3 Configuration de bus CA.....	25
I.7.4 L'aspect pratique de la configuration de bus exclusivement CA.....	25
I.8 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement de SEH.....	26

I.8.1	Commande des SEH.....	29
I.8.2	Stratégie de fonctionnement.....	29
I.9	Conclusion.....	30

Chapitre II

Besoins Énergétique d'un Habitat

II.1	Introduction.....	31
II.2	Maison à Energie Positive (MEP).....	31
II.2.1	Les concepts de maisons performantes.....	31
II.2.2	Définition d'une Maison à Energie Positive.....	32
II.3	Techniques utilisées dans une maison à énergie positive.....	33
II.4	Contexte énergétique algérienne.....	34
II.5	Problématique liée aux pics de consommation.....	34
II.6	Le secteur du bâtiment : Principal consommateur énergétique dont la consommation ne cesse de croître.....	35
II.6.1	Position du bâtiment dans la maîtrise de l'énergie.....	35
II.6.2	Impact du secteur bâtiment.....	35
II.7	Caractéristiques d'une maison à basse consommation d'énergie.....	37
II.7.1	Une conception bioclimatique de l'habitat.....	37
II.7.2	Une forte isolation thermique.....	38
II.8	La production d'eau chaude sanitaire.....	39
II.8.1	Consommation des chauffe-eau.....	39
II.8.2	Comment réduire les besoins du poste « eau chaude sanitaire » ?.....	40
II.9	Quelques exemples de profils de consommation.....	42
II.9.1	Modélisation d'un profil de consommation type par estimation des besoins énergétiques de l'habitat.....	43
II.9.2	modélisation d'un profil de consommation par acquisition de données réelles.....	46
II.10	Conclusion.....	49

Chapitre III :

Etude d'un Système Hybride Pour l'Alimentation d'un Habitat

III.1 Introduction.....	50
III.2 Description d'une centrale hybride.....	51
III.3 Dimensionnement de l'installation hybride.....	52
III.4 Modélisation du système hybride.....	52
III.4.1 Générateur photovoltaïque.....	52
III.4.1.1 Le rayonnement solaire.....	53
III.4.1.2 Modélisation du générateur PV.....	54
III.4.1.3 Avantages et inconvénients des PV.....	56
III.4.2 Générateur éolienne.....	58
III.4.2.1 Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation.....	58
III.4.2.2 Modélisation de la turbine.....	58
III.4.2.3 avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	59
III.4.3 Générateur Diesel.....	60
III.4.4 Modélisation de la batterie.....	62
III.5 Les systèmes de stockage.....	63
III.6 Onduleurs.....	63
III.7 Charge.....	63
III.8 Systèmes hybrides de production d'électricité.....	64
III.9 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH.....	65
III.10 simulation du système hybride.....	66
III.11 conclusion.....	68

Chapitre IV :

Application et interprétations des résultats

IV.1 Introduction.....	69
IV.2 Architecture des systèmes hybrides.....	70
IV.2.1 Architecture à bus CC.....	70
IV.2.2 Architecture à bus CC /CA.....	70
IV.3 Application : Une habitation à Ghardaïa.....	71
IV.3.1 L'emplacement choisit.....	71
IV.3.2 Evaluation de la consommation.....	72
IV.3.2 Estimation des ressources énergétiques solaire et éolienne, diesel.....	73
IV.3.2.1 Potentiel éolien.....	73
IV.3.2.2 potentiel solaire.....	74
IV.4 Construction de système hybride de génération d'énergie.....	77
IV.4.1 Le générateur photovoltaïque.....	80
IV.4.2 Le générateur éolien.....	81
IV.4.2 Le générateur diesel.....	82
IV.5 Système hybride éolien-diesel.....	84
IV.5.1 Principe de fonctionnement d'un système hybride éolien diesel.....	84
IV.5.2 Configuration et simulation du modèle.....	85
IV.6 Conclusion.....	89
Conclusion Générale.....	90
Bibliographie	92

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, la consommation d'énergie va continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés.

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles et fissiles : le gaz à effet de serre.

Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables.

En ce qui concerne notre pays : l'Algérie, l'enjeu du développement des énergies renouvelables est encore plus important. En effet, ces énergies permettront de plus en plus de couvrir la croissance nécessaire et légitime des services énergétiques de base dans les domaines du développement rural, de l'habitat, de la santé, de l'éducation puis à long terme, de l'industrie.

Notre travail se divise en quatre chapitres. Après une brève introduction, le premier chapitre présente globalement l'Etat de l'art sur les systèmes d'énergie hybrides.

Le chapitre suivant est consacré aux besoins énergétiques d'un habitat, dans ce chapitre nous avons réduit les consommations d'énergie dans le bâtiment.

Le troisième chapitre s'intéresse à l'étude d'un système hybride pour l'alimentation d'un habitat. L'objectif de ce travail, est l'étude d'une centrale de production électrique hybride, qui combine entre deux sources d'énergies renouvelables conçu pour l'alimentation d'un site isolé (un habitat dans un site isolé).

Enfin, le quatrième chapitre définit une application des nous études dans le site de Ghardaïa. Pour but d'améliorer la qualité de l'énergie produite par un système de production d'énergie électrique, un système hybride est proposée dans ce chapitre. Une application d'un système hybride est simulé sur le logiciel HOMER afin d'alimenter un site situé à une région de la ville de Ghardaïa, pour une optimisation qui permet de déterminer le type du système hybride réel a installé.

CHAPITRE

I

Chapitre I

Etat de l'art sur les systèmes d'énergie hybrides

I.1 Introduction

Le terme « Système d'Energie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées mais la présence du générateur diesel dans ce type de système hybride autonome suscite certaines discussions quant aux notions de « propreté » et de durabilité [1] et [2].

I.2 L'origine de la notion du système

Un système est un ensemble d'objets organisés en fonction d'un but et immergé dans un environnement.

- Le système est un outil conceptuel ;
- L'ensemble doit former une identité ou une unité cohérente et autonome ;
- Les objets ou éléments peuvent être réels ou conceptuel ;
- La notion d'organisation implique des relations, interrelations, interactions dynamiques entre les objets. (définition de J. L. le Moigne dans [3])

I.3 Définition et missions des systèmes hybrides

Un système d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergies : une ou plusieurs sources de production d'énergie classique (groupe diesel en général) et au moins une source de production d'énergies renouvelables. L'objectif d'utiliser des technologies multiples est de réunir les avantages et les meilleures caractéristiques opérationnelles de chaque système [4] et [5].

Les performances d'un SEH (le rendement et la durée de vie) sont influencées d'une part par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants,

l'architecture etc., et d'autre part par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ces performances sont : l'économie de carburant, le coût du KW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien etc.

Dans l'un de ses travaux, Museliet al. [6] a suggéré que la configuration optimale pour les systèmes hybrides devrait être déterminée en minimisant le coût du kilowatt heure. Ashok [7] a développé pour sa part un modèle de système fiable basé sur un modèle d'optimisation hybride pour la production d'électricité renouvelable (HOMER). Ainsi, pour trouver un système hybride optimal parmi des combinaisons de l'énergie renouvelable différentes nous procédons en minimisant le coût du cycle de la vie totale. La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en réseaux interconnectés)[4]. Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes, ainsi que la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.

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 I.1).

Tableau I.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...
Grand : >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 [5] défini par la proportion de la puissance (énergie) produite par les sources d'énergie renouvelable et la puissance demandée par la charge demandée.

I.4 Principaux composants des systèmes hybrides

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

1.4.1 Le réseau électrique (réseau de distribution)

Comprend les lignes et les postes de transformation servant à alimenter les clients. Ce réseau est composé de deux parties, le réseau de distribution à moyenne tension (2,4 kV à 64 kV) et le réseau de distribution à basse tension (120 à 600 V).

Les postes de transformation servent à augmenter ou à abaisser la tension et à régulariser celle-ci au moyen de compensateurs statiques, de réactances capacitives ou inductives et de transformateurs à prises variables. Ils contiennent aussi les disjoncteurs, fusibles et parafoudres destinés à protéger les appareils et le réseau. Les postes d'interconnexion servent à relier le réseau avec d'autres réseaux afin d'augmenter la stabilité de l'ensemble et de permettre des échanges d'énergie,

1.4.2 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 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 [8].

La plupart des cellules PV mesurent autour 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 [9], [10], [11]

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 polycristallin 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 I.1).

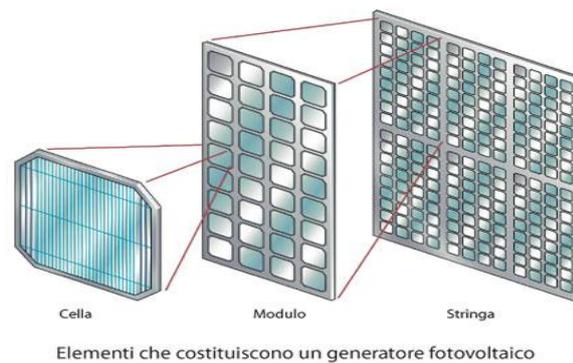


Figure I.1 : modules photovoltaïques

Caractéristique d'un module

Voici la description des paramètres d'un module [12] :

- **La puissance crête P_c** : la puissance maximale produite par un module photovoltaïque dans les conditions standards : ensoleillement de 1000 W/m^2 à l'horizontale, température ambiante de 25°C , masse d'air optique (AM) égale à 1.5.
- **La caractéristique $I(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide V_{co}** : tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairage « plein soleil ».
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairage « plein soleil ».
- **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$.
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incident.

- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$.

I.4.3 Eoliennes

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne ») est une machine qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique. La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne. (Figure I.2)

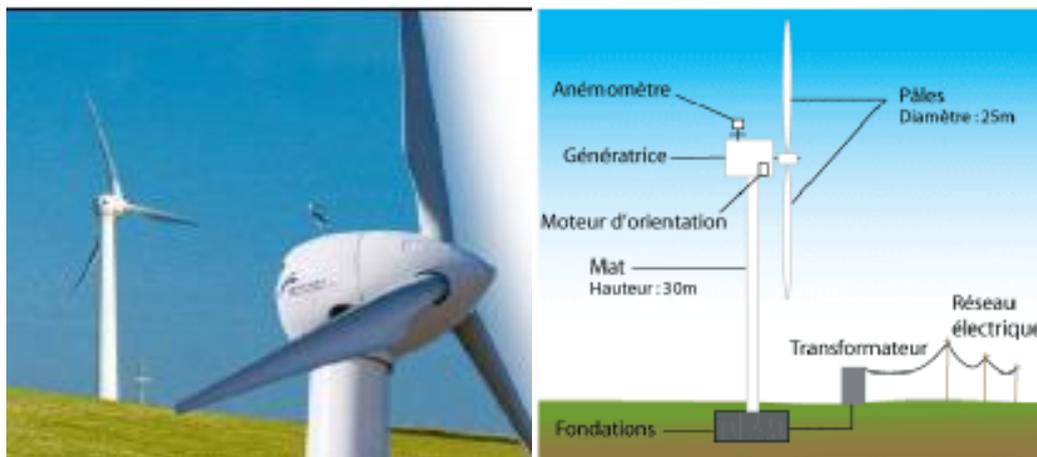


Figure I.2 : Eolienne à axe horizontal

Le petit éolien, désigne les éoliennes de petites et moyennes puissances, de 1000 Watts à 20 Kilowatts, montées sur des mâts de 10 à 35 mètres, raccordées au réseau ou bien autonomes en site isolé. Le petit éolien est utilisé pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques (pompes, éclairage, ...) de manière économique et durable, principalement en milieu rural. Par exemple, une petite éolienne accompagnée d'un module solaire photovoltaïque et d'un parc de batteries peut garantir l'autonomie énergétique d'un voilier (éclairage, instruments de bord...).

L'élément essentiel pour qu'une petite éolienne soit économiquement rentable est le vent, qui doit être à la fois puissant et fréquent. Les petites éoliennes classiques sont généralement à axe horizontal. Elles comprennent le plus souvent deux à trois pales [13].

Les petites éoliennes peuvent avoir un système mécanique de modification de l'angle de calage des pales ou d'orientation face au vent, alors que les grandes éoliennes utilisent des systèmes de commande électriques. Les différents types de protections utilisées par les petits systèmes éoliens sont :

- Basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal [14] ;
- Pas variable par pression du vent. Les pales en fibre se déforment et provoquent un décrochage ;
- Déviation par rapport à l'axe du vent. Le rotor se trouve légèrement décalé par rapport à l'axe de rotation et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique.

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Cette configuration basée sur la caractéristique de la vitesse. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration.

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones. Celle utilisé dans cette étude est la génératrice synchrone.

Génératrices synchrones

Dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique), on utilise des machines synchrones (figure I.3). Leur performances, notamment en terme de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles. Leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose naturellement. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable.

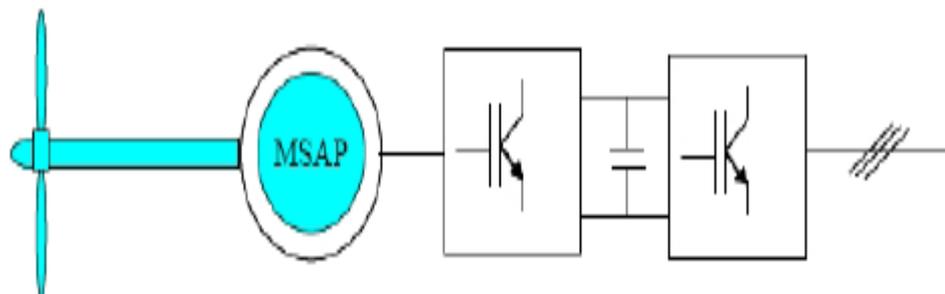


Figure I.3 : système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [15]

Les performances des machines synchrones multipolaires, notamment en termes de couples massique, sont très intéressantes. Leur vitesse de rotation étant différente de celle liée à la fréquence du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose. Ce type de générateur à inducteur bobiné nécessite un système de bagues et balais pour transmettre le courant continu (figure I.3). Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur.

I.4.4 Piles à combustibles

Parmi les technologies envisagées pour 'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée, la pile à combustible est considérée comme une solution très prometteuse [16].

Ce convertisseur d'énergie, à la fois propre et efficace, permet de convertir l'énergie chimique de l'hydrogène, vecteur énergétique fortement pressenti pour le futur par de grands spécialistes mondiaux au vu de son énergie massique 3 fois plus importante que l'essence, en une énergie électrique, utilisable directement, et une énergie thermique qu'il est possible de valoriser. L'utilisation de cette cogénération permet d'atteindre des rendements très intéressants, jusqu'à 80% dans certains cas.

Les piles à combustibles (PAC) (figure I.4), générateurs statiques d'électricité et de chaleur. Deux technologies sont actuellement prometteuses et connaissent d'intenses efforts de R&D. D'une part les PAC à membrane polymère PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) fonctionnant à des températures basses comprises entre 50 et 90 °C qui sont les plus développées. Le rendement en électricité, supérieur à 80% en théorie, est supérieur à 50% en pratique. D'autre part les PAC à oxydes solides SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) fonctionnant à des températures supérieures à 600 °C ce qui implique un moins haut rendement mais permet de valoriser la chaleur produite en cogénération.

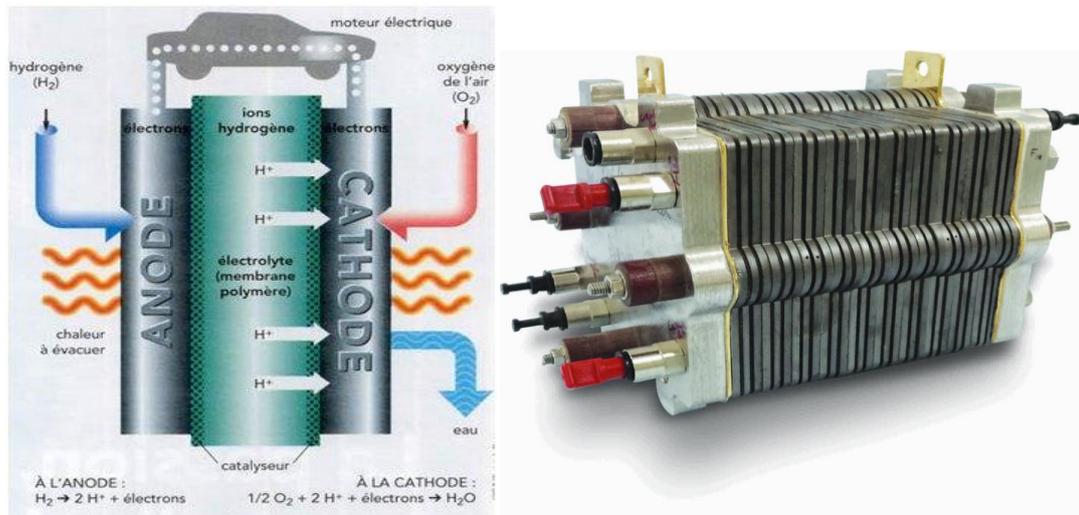


Figure I.4 : piles à combustibles

I.4.5 Générateur diesel

Dans le cas des installations à sources d'énergie renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesel. Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (figure I.5). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse (régulateur de vitesse) sur le moteur diesel [17].

Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

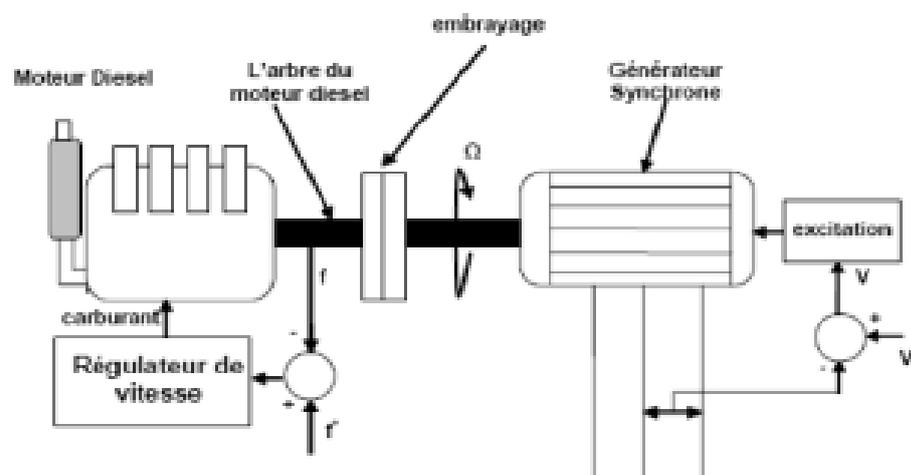


Figure I.5 : Configuration du générateur diesel [18]

Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive.

Quand plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus à CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesel.

I.4.6 Systèmes de stockage

En fonction de la consommation journalière de l'énergie, avec ses creux et ses pointes, on utilise depuis fort longtemps des installations de stockage pour répartir quelque peu la production continue. Elles sont très utiles dans de nombreuses applications électriques. Les maisons à énergie positive sont l'une de ces applications. Ces installations se diffèrent suivant la stratégie de stockage. La stratégie de stockage à court terme « Peak Shaving Strategy » [19], permet de filtrer les fluctuations des énergies renouvelables et/ou de la charge. Elle est généralement utilisée pour les sites connectés aux réseaux. Par contre, la stratégie de stockage à long terme « Cycle Charge Strategy » [19], est utilisée généralement dans les sites isolés pour alimenter la charge sur une période de temps plus longue. Pas tous les types d'énergies peuvent être stockés d'une manière efficace, et en quantité importantes [20]. L'énergie solaire thermique peut être stockée sous forme d'eau chaude dans un réservoir d'eau isolant dans les systèmes de production d'eau chaude sanitaire, ou à travers les murs et les fenêtres qui permettent de stocker de la chaleur pour la restituer pendant la nuit.

Différents moyens de stockage peuvent être utilisés dans les maisons à énergie positive. Les technologies les plus développées sont les accumulateurs électrochimiques, les volants d'inertie et les super condensateurs [21]. L'utilisation des batteries électrochimiques est très répandue et en plein essor, notamment avec le développement du véhicule électrique [22]. Les grandes familles d'accumulateurs disponibles sont actuellement celles au plomb acide et au sodium à électrolyte d'alumine (NaS) [23]. Les batteries au plomb acide sont la solution la plus rentable mais elles ont des cycles de vie limités, des densités énergétiques basses et de faibles rendements [24][25]. En plus, un convertisseur DC/AC est indispensable pour interfacer une batterie avec un système à courant alternatif, car elle stocke le courant continu.

I.4.7 Systèmes 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 diesel, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.

Vu le caractère aléatoire des conditions climatiques (la température ambiante, l'éclairement et la vitesse du vent) et de la consommation, un ajustement en temps « réel » est nécessaire, pour optimiser les transferts d'énergie des générateurs PV et d'éolien. Ainsi, les chargeurs des batteries, incluent souvent un système de commande pour empêcher la surcharge des batteries ou que leur état de charge baisse trop. Le bus continu doit aussi maintenir une tension stable à ses bornes, cela est assuré par les batteries, à travers la commande d'un convertisseur d'énergie intercalé entre les deux.

La tension sinusoïdale assurée par l'onduleur, après le bus continu, doit répondre à certaine norme. Le système de commande veille pour que l'amplitude, la fréquence et le taux de distorsion harmonique (THD) de la tension aux bornes de la charge soit normatif, pour ne pas détériorer les appareils domestiques, et pour diminuer la pollution dans le réseau électrique en cas d'injection de l'énergie.

Le système de commande et de supervision control aussi la température d'eau chaude domestique, en commandant le débit du fluide caloporteur qui circule dans la collecteur. Cela se fait en agissant sur une pompe, située entre le collecteur et le réservoir de stockage d'eau chaude ; ainsi que la température de la maison si on exploite la chaleur de l'eau produite. Ceci contribue à aider le chauffage de la maison à travers un chauffage auxiliaire, et une pompe.

Pour assurer ces commandes, la maison doit être largement dotée d'instruments de mesures. Des capteurs doivent permettre d'obtenir les conditions météorologiques (la température ambiante extérieure, l'éclairement et la vitesse du vent) ; les températures d'eau d'alimentation du réservoir de stockage, de l'eau chaude et la température ambiante à l'intérieure de la maison. D'autres capteurs doivent transmettre les mesures de courants et les tensions au niveau de : la chaîne de production photovoltaïque, la chaîne de production éolienne, les batteries, le bus continu et le réseau (figure I.6).

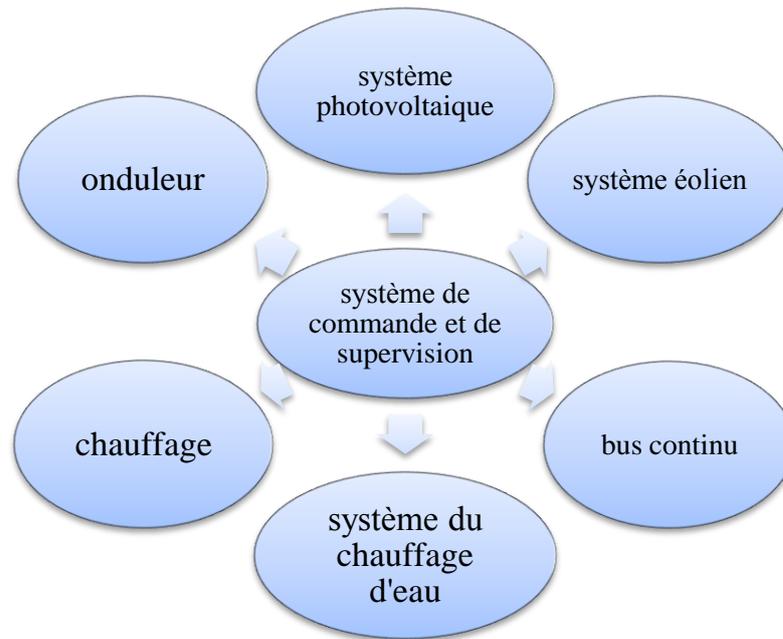


Figure I.6 : Schéma synoptique de système de commande et supervision

I.4.8 Convertisseurs électrique

Dans une maison à énergie positive, des convertisseurs sont utilisés pour optimiser et stabiliser l'énergie et pour transformer le courant continu en courant alternatif et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans de tels systèmes : les hacheurs, les onduleurs et les redresseurs.

I.4.8.1 Les hacheurs (convertisseur DC/DC)

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue du départ peut être fournie à un réseau alternatif redressé et filtré. Une batterie d'accumulateurs assure une alimentation stabilisée.

On distingue deux types de convertisseurs continu-continu. Ceux qui sont non isolés, et ceux qui comportent un transformateur assurant l'isolation galvanique, (cas des alimentations de PC...) [26]. Dans les convertisseurs non isolés, on peut faire une autre distinction. Les hacheurs réversibles et les hacheurs non réversibles.

Les hacheurs non réversibles, sont ceux qui n'assurent pas la réversibilité, ni en tension, ni en courant. L'énergie ne peut donc aller que de la source vers la charge. On distingue :

- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_o < V_i$.

- Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_o > V_i$.
- Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents qui comporte plusieurs topologies comme le BUCK-BOOST classique, le FLYBACK, SEPIC, CUK, et le FORWARD.

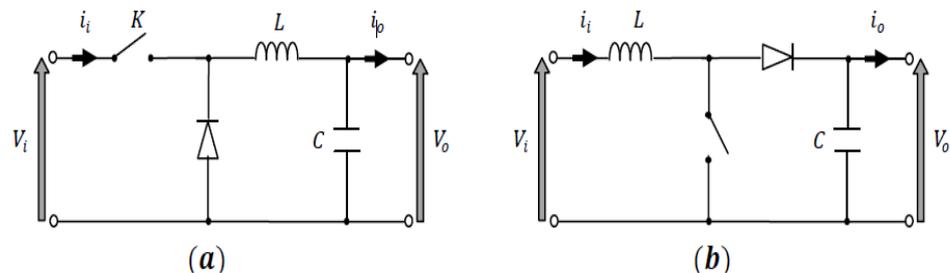


Figure I.7 : Schéma de principe d'un hacheur : (a) abaisseur (b) élévateur.

Contrairement aux hacheurs non réversibles, ni en tension, ni en courant, où l'énergie va toujours de la source vers la charge. Dans les hacheurs réversibles, une source peut devenir une charge et inversement. Il est donc possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. Ce type de comportement se rencontre usuellement dans les systèmes électriques. Ainsi, un moteur en sortie d'un hacheur représente une charge. Cependant, si on veut réaliser un freinage, le moteur va devenir générateur, ce qui va entraîner un renvoi d'énergie à la source (plus astucieux qu'un simple freinage mécanique).

Selon le type de conversion, tension ou courant, on distingue trois types de hacheurs réversibles :

- Les hacheurs réversibles en courant.
- Les hacheurs réversibles en tension.
- Et les hacheurs réversibles en tension et en courant.

I.4.8.2 Les onduleurs (convertisseur DC/AC)

Les onduleurs de tension sont des convertisseurs statiques qui servent principalement à alimenter, à fréquence fixe ou variable, des charges alternatives. Le but recherché est l'obtention pour chaque tension de sortie d'une forme d'onde approximant au mieux la sinusoïde.

L'onduleur est dit autonome si l'établissement et la connexion entre l'entrée et la sortie ne dépendent que de la commande des semi-conducteurs [27].

On distingue deux types d'onduleurs :

- Les onduleurs autonomes de tension : sont alimentés par une source de tension continue, d'une impédance interne négligeable et de tension constante peu affectée par les variations du courant qui la traverse.
- Les onduleurs autonomes de courant sont alimentés par une source de courant.

Dans les onduleurs de tension. On distingue :

- Les onduleurs monophasés ; en pont et en demi-pont, qui sont destinés à alimenter des charges alternatives monophasées de faible puissance.
- Les onduleurs triphasés ; ils couvrent la gamme de moyenne et de forte puissance. L'objectif de cette topologie est de fournir une source de tension triphasée, dont l'amplitude, la phase et la fréquence sont contrôlables [28].

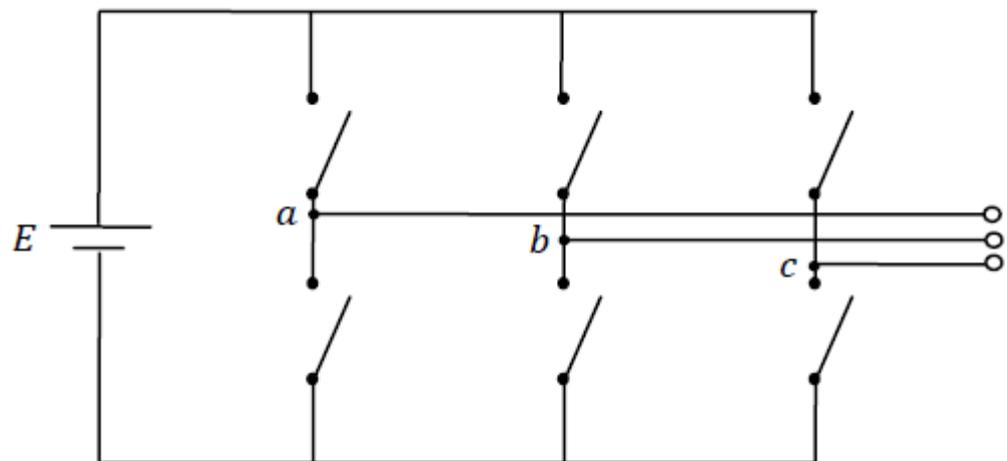


Figure I.8 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension

Le domaine d'application des onduleurs de tension (figure I.8) peut être caractérisé par la variation de la fréquence. On distingue deux grandes familles [29]:

- **Le domaine des fréquences fixes** : où l'onduleur de tension est destiné à palier les défaillances, ou même l'absence d'un réseau alternatif en recréant la tension correspondante à partir d'une source de tension continue. Cette application requiert généralement la fourniture d'une tension de sortie très pure, donc sans les harmoniques de découpage, d'où la nécessité d'un filtre de sortie.

- **Le domaine des fréquences variables** : dans ce cas, l'onduleur est généralement alimenté par un réseau alternatif à travers un redresseur et un filtre d'entrée. L'application la plus connue est celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif.

I.4.8.3 Les redresseurs (convertisseur AC/DC)

Les montages redresseurs, souvent appelés simplement redresseurs, sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion alternatif-continu. Alimentés par une source de tension alternative monophasée ou polyphasée, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie [30].

On utilise un redresseur chaque fois que l'on a besoin du continu alors que l'énergie électrique est disponible en alternatif. Comme c'est sous cette seconde forme que l'énergie électrique est presque toujours générée et distribuée, les redresseurs ont un très vaste domaine d'applications.

Suivant la possibilité d'ajuster la tension de sortie, deux grandes familles de redresseurs peuvent être distinguées [31]:

- Les redresseurs non commandés, ou redresseurs à diodes, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie. De plus, ils sont irréversibles, c'est-à-dire que la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu.
- Les redresseurs commandés, ou redresseurs à thyristors, permettent, pour une tension alternative d'entrée fixée, de faire varier la tension continue de sortie. Ils sont de plus réversibles ; lorsqu'ils assurent le transfert de puissance du côté continu vers le côté alternatif, on dit qu'ils fonctionnent en onduleurs non autonomes.

Pour obtenir une tension continue, on redresse un ensemble de q tensions alternatives, d'ordinaire supposées sinusoïdales et formant un système polyphasé équilibré (nombre de phases q). Ces tensions peuvent être les tensions aux bornes d'un alternateur. Généralement, elles sont fournies par le réseau monophasé ou, plus souvent, par le réseau triphasé, d'ordinaire par l'intermédiaire d'un transformateur.

On distingue trois types de montages [31] :

1.Pq: montages avec source en étoile et un seul commutateur ou redresseur "simple alternance" ;

2.PDq: montages avec source en étoile et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source étoilée ;

3.Sq: montages avec source en polygone et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source polygonale.

La figure (I.9) donne le schéma électrique des montages P3, PD3 et S3. Ces trois montages sont le plus communément utilisés pour le redressement de tensions triphasées.

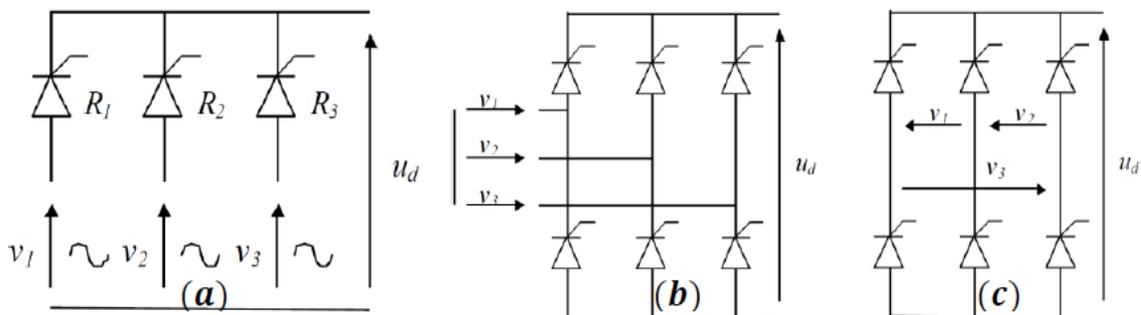


Figure I.9 : Redresseurs triphasés : (a) P3, (b) PD3, (c) S3.

I.4.9 Charges

Les charges sont les éléments consommateurs de puissance électrique d'un système. La consommation de cette puissance électrique dépend des caractéristiques de la charge [32]. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules d'éclairage, les chauffages électrique, les chauffe-eaux etc. les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de la puissance réactive. Des charges à courant continu peuvent exister dans une maison, ils peuvent aussi avoir des composants inductifs [33].

I.5 Structure des systèmes de génération

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesel (GD) et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SEH peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des

charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Celles-ci sont résumées dans la Figure I.10. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [32] : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution.

Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées un bus à CA ou à CC en fonction de la dimension et la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance :

Onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. A part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un SEH avec des batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelable et des diesels), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite, il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source.

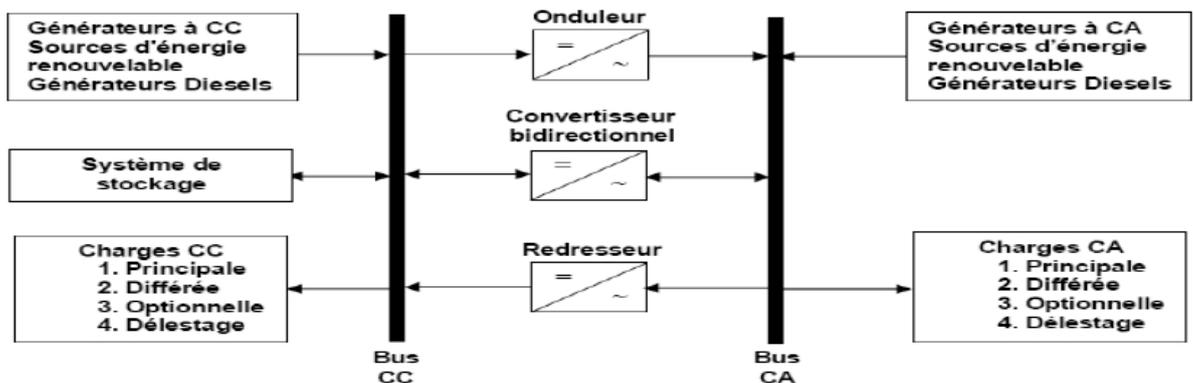


Figure I.10 : Architecture des SEH

I.6 Alimentation en énergie des régions éloignées de tout réseau

I.6.1 Les systèmes autonomes et isolés

On peut potentiellement envisager l'utilisation d'un système d'énergie hybride via des alternatives énergétiques possédant les même propriétés que les hydrocarbures tel que : les énergies

renouvelable pour tout système nécessitant de l'énergie. Néanmoins, aujourd'hui, la mise en application de ce type des 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 électrique, intégrant entre autres, des sources renouvelables et un stockage d'énergie via batteries de stockage et hydrogène, installation isolée.

I.6.2 Exemples de topologies de systèmes hybrides

Nous présentons ici une rapide synthèse des études de quelques topologies possibles pour un système hybride, qui ont été réalisées et qui nous ont conduits à l'étude de ces systèmes.

Quelques exemples, habituellement utilisés à l'échelle industrielle, d'architectures de chaînes de conversion d'énergie sont donnés en association avec différents types de génératrices. Dans les limites de nos travaux, nous nous sommes intéressés à des systèmes hybrides de petite puissance dédiés à un site isolé et autonome.

Solaire-éolien, batteries de stockage, installation isolée

Fréquemment rencontrée dans les pays développés : alternative au réseau et dans les pays en voie de développement : électrification rurale

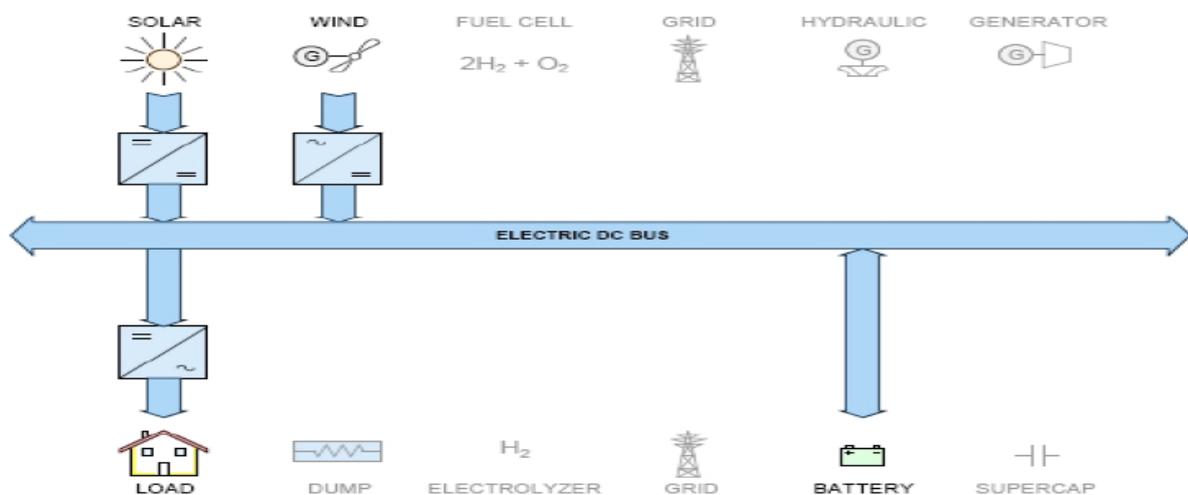


Figure I.11 : Solaire-éolien, stockage à batteries, installation isolée [33]

Solaire-éolien, batteries de stockage et hydrogène, installation isolée

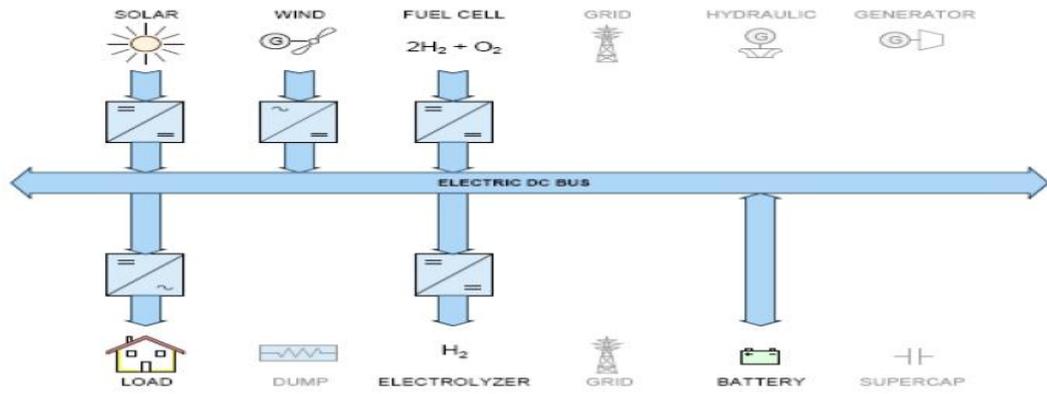


Figure I.12 : solaire-éolien, batteries de stockage et hydrogène, installation isolée [34]

Solaire-éolien, stockage à hydrogène, installation isolée

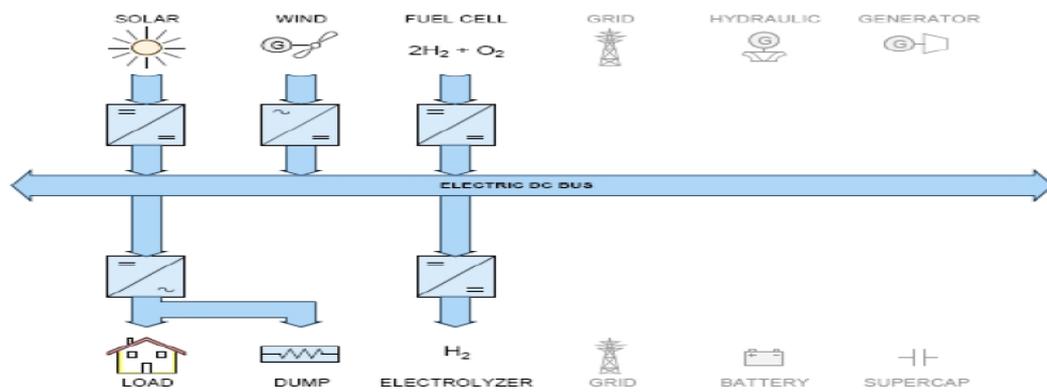


Figure I.13 : Solaire-éolien, stockage à hydrogène, installation isolée [35]

Eolien, stockage à hydrogène et par super condensateurs, installation isolée

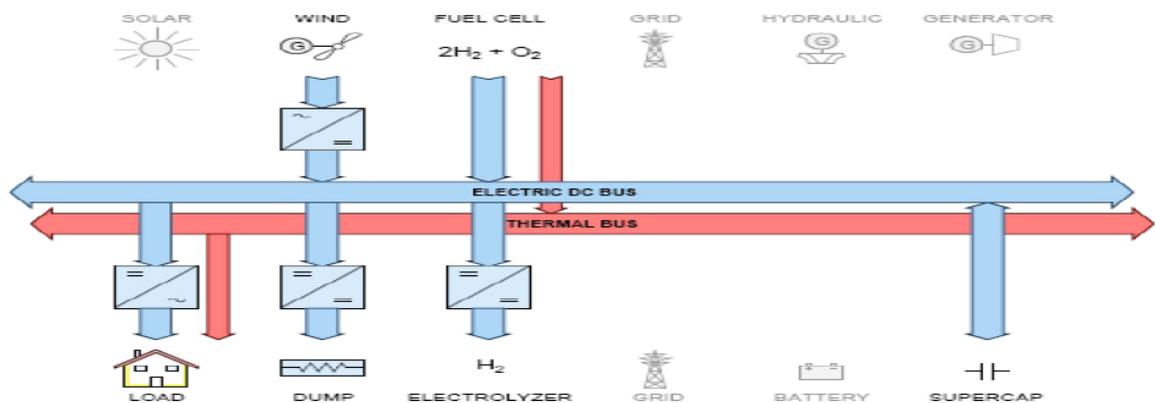


Figure I.14 : Eolien, stockage à hydrogène et par super condensateurs, installation isolée [36]

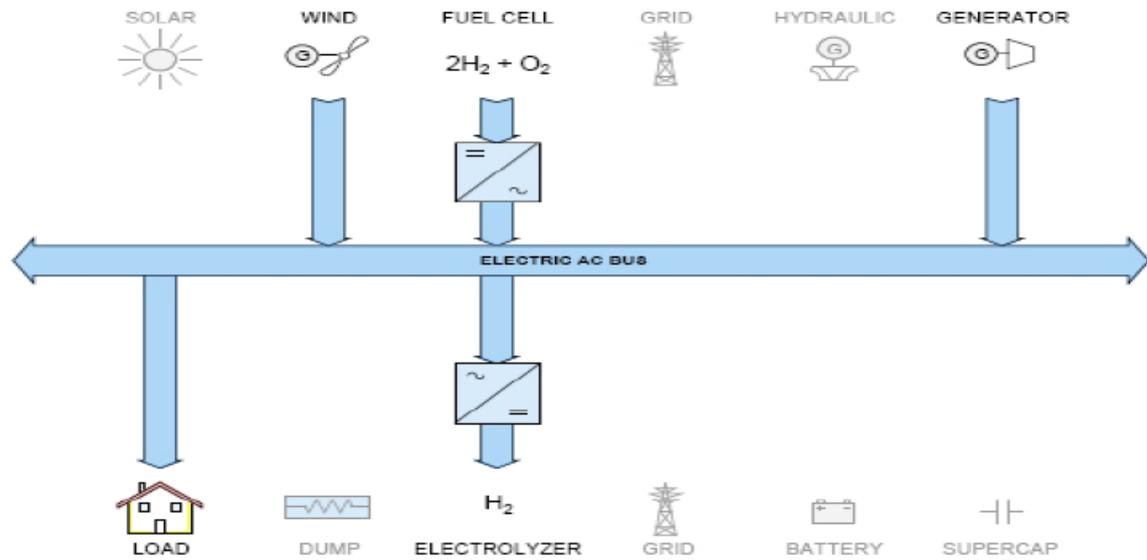
Eolien-diesel, stockage à hydrogène, installation isolée

Figure I.15 : Eolien-diesel, stockage à hydrogène, installation isolée [37]

On a présenté un aperçu des topologies des systèmes hybrides les plus répandues. Les figures (I.11 - I.12 – I.13 – I.14 – I.15) montrent les diagrammes schématiques de quelques exemples des types de système hybride.

L'analyse des divers systèmes présents en littérature montre un schéma (modèle) général de système hybride, avec des types différents de convertisseurs nécessaires

CA/CC – CC/CC, unidirectionnel – bidirectionnel, différents niveaux de tensions et courants ainsi que des systèmes de contrôle différents.

I.7 Configuration de bus dans les systèmes hybrides

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configuration. Ces configurations constituées par des sources d'énergies renouvelables, des batteries et des générateurs diesels se résument en trois types :

Architecture à bus CC (bus à courant continu) et architecture à bus CC-CA (la connexion mixte, bus à CA et bus à CC) [38], architecture à bus CA (bus à courant alternatif) [39].

Nous présenterons ci-après, une description ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque configuration.

I.7.1 Architecture à bus CC

Cette technologie est née du besoin de coupler des consommateurs CA (plage de puissance moyenne) avec des générateurs CC et, de plus, de charger la batterie du côté CC par le biais d'un groupe électrogène (à ce propos, voir la figure I.15).

Ces configurations d'installation servent l'alimentation de consommateurs éloignés (par ex. petites entreprises ou fermes). La plage de puissance globale est située entre 1 et 5 kW, la tension CC allant de 12 à 48 V.

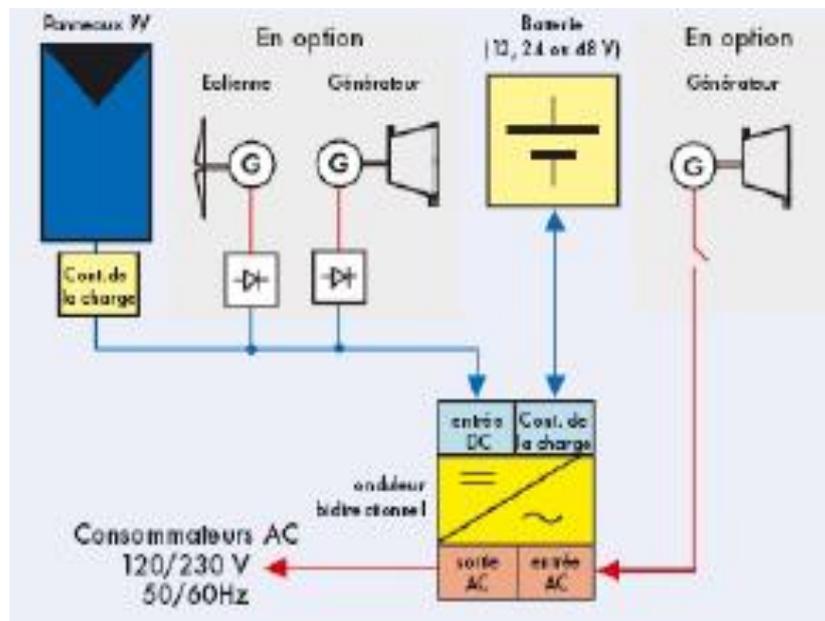


Figure I.16 : petits systèmes de puissance CA avec composants couplés du côté CC [40]

Un couplage CC (toute l'énergie converge vers un bus CC) [41][42].

Dans le système hybride présenté dans la figure I.16, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Le ou les générateur(s) diesel(s) sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges à CA. Les générateurs diesels ne peuvent donc pas alimenter les charges à CA directement. L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence [43]. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge, alors que le générateur diesel est dimensionné pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps. La puissance délivrée peut être contrôlée par la commande du courant d'excitation de la partie

électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable. Les avantages et les désavantages d'un tel système sont présentés ci-après.

Avantages

- La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85%.

Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

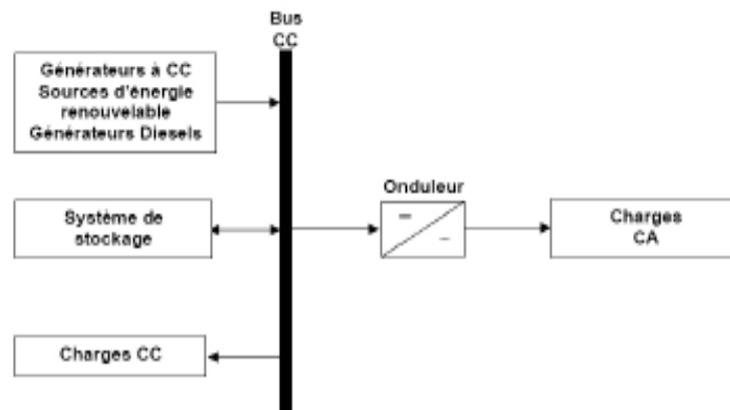


Figure I.17 : Configuration du SEH à bus CC

I.7.2 Architecture mixte à bus à CC/CA

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans la figure I.17. Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure (un couplage CC). Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur. Le ou les générateur(s) diesel(s) et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie. Le

convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur) [44],[45]. Quand il y a un surplus d'énergie de la part du générateur diesel, il peut aussi charger les batteries (fonctionner en redresseur).

L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est surchargé.

Pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage, est très répandue [46] [47].

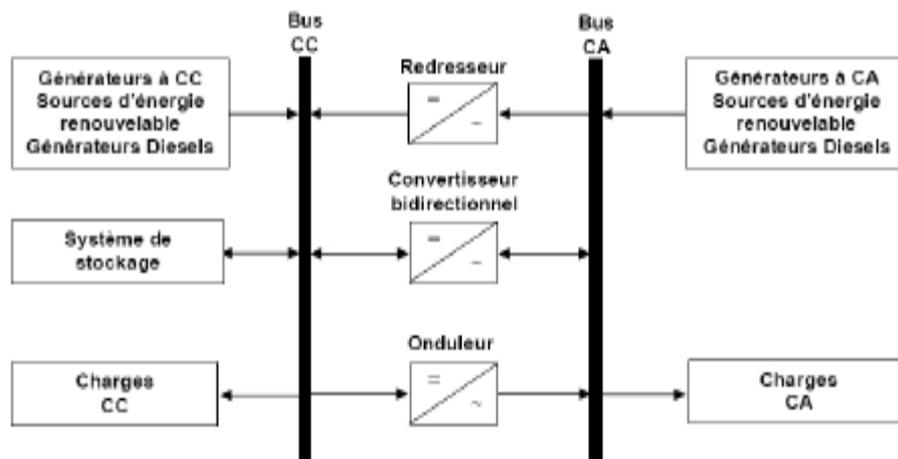


Figure I.18 : Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA

Avantages

- le GD et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- La possibilité de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

Inconvénients

- La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions en sortie du GD).

I.7.3 Configuration de bus CA

Des nouvelles approches sont proposées pour améliorer la modularité par un couplage CA (toute l'énergie converge vers un même bus CA) [48], [49]. Toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs sauf le générateur diesel qui peut fixer la fréquence de bus.

I.7.4 L'aspect pratique de la configuration de bus exclusivement CA

Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA (voir figure I.19) permet désormais de réaliser des systèmes flexibles constitués des composants modulaires. En fonction de l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles. Le système peut en outre être élargi en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants.

Ces structures peuvent être utilisées pour l'alimentation de tous les consommateurs électriques, y compris dans les régions rurales des pays en voie de développement et des pays nouvellement industrialisés dans lesquels l'électricité, l'approvisionnement en eau et la purification de l'eau potable sont des besoins vitaux.

L'ingénierie des systèmes modulaires avec couplage du côté CA a été développée pour la première fois par l'institut national de l'énergie solaire (ISET, Université de Kassel) et par l'entreprise SMA Technologie AG.

L'utilisation du courant alternatif présente plusieurs avantages et inconvénients :

Avantages

- Un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres ;
- Le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence de bus (CA).
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif (transformateur) ;
- Appareillage de connexion bon marché et disponible facilement ;
- Les circuits triphasés produisent un champ magnétique rotatif permettant des moteurs compacts et efficaces ;
- La fréquence peut être utilisée comme moyen de contrôle (dérive de fréquence) [50]

Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs ;
- La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande

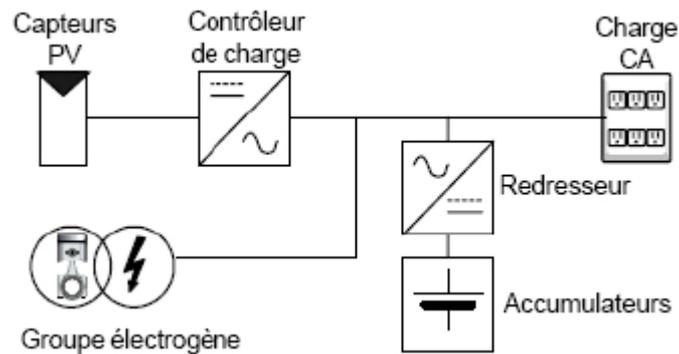


Figure I.19 : Configuration de bus CA

I.8 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement de SEH

Compte tenu de la nature stochastique des sources d'énergie renouvelable, la difficulté principale des SEH comportant ce type de source est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge. Le moyen le plus simple d'éviter une augmentation du risque de ne pas satisfaire complètement la charge est de faire fonctionner les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels en parallèle, de façon continue (le générateur diesel fonctionne sans arrêt). Dans ce type de fonctionnement, les sources d'énergie renouvelable agissent comme une charge négative, en réduisant la charge moyenne des générateurs diesels [51].

Ceux derniers peuvent fonctionner à une puissance très basse (figure I.20), mais l'économie de carburant est modeste à cause du rendement très faible (en fonctionnement à vide, la consommation de carburant s'estime à 25-30% de la consommation à pleine charge). Ainsi, garder un moteur diesel au régime de ralenti pour une demande de puissance nulle suppose une consommation de carburant non négligeable.

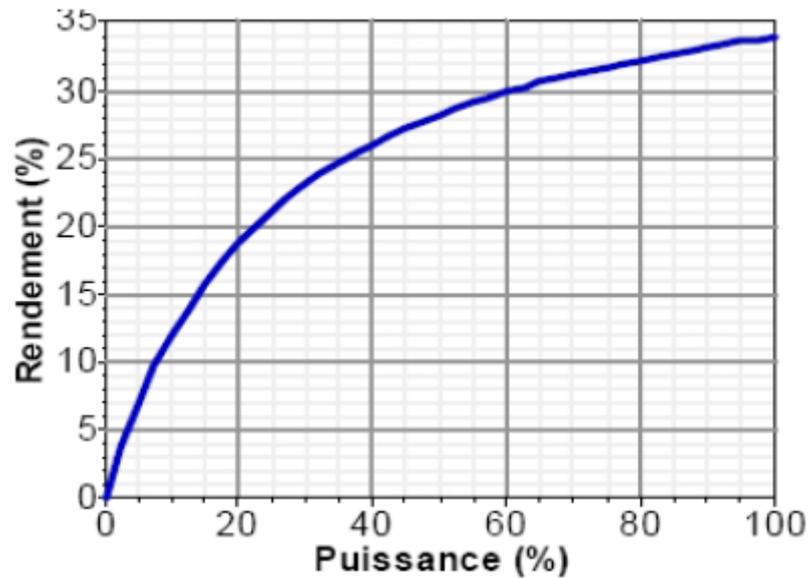


Figure I.20 : Courbe du rendement d'un moteur diesel ayant une puissance nominale de 75 KW

Si l'énergie renouvelable est suffisante pour alimenter la plupart de la charge, la quantité de carburant économisé peut alors être augmentée en faisant fonctionner les générateurs diesels par intermittence. En fonctionnement intermittent, les générateurs diesels démarrent et s'arrêtent en fonction de la variation de l'énergie renouvelable et la charge. Le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels peut, par conséquent, être très élevé. Le problème dans ce cas est l'usure prématurée des GD et de leurs démarreurs. Un autre problème devant être pris en compte quand le générateur diesel fonctionne par intermittence est le temps nécessaire pour le démarrage et l'arrêt. Le système peut, par exemple, s'effondrer subitement pendant le démarrage de générateur diesel, si l'énergie renouvelable diminue plus vite que le temps nécessaire pour la phase de démarrage.

Il arrive parfois que la production d'énergie renouvelable soit plus importante que la consommation de la charge. Si l'excès d'énergie dans le réseau ne peut pas être éliminé, la production d'énergie renouvelable doit alors être limitée ou même arrêtée. En général, les systèmes sans stockage utilisent une charge de délestage pour maintenir l'équilibre énergétique et la stabilité de la fréquence. D'autres applications nécessitent des systèmes de commande supplémentaires pour maintenir la qualité de la tension. Tous ces dispositifs, tels que les charges de délestage et les systèmes de commande, augmentent le coût d'investissement qui ne peut pas être justifié par les avantages du système hybride. Seule une stratégie de commande adéquate peut permettre d'intégrer de manière optimale différents composants et donc de rendre le système rentable.

La dynamique des générateurs d'énergie renouvelable peut aussi causer des problèmes dans le fonctionnement des SEH. Par exemple, le démarrage d'une éolienne quand la vitesse du vent est élevée. Dans ce cas, la puissance produite par l'éolienne atteint presque instantanément la puissance nominale du générateur. Ces changements rapides dans la production d'énergie peuvent générer des problèmes de qualité d'énergie (variation de tension et de fréquence) et même l'arrêt complet du système.

Les générateurs asynchrones, largement utilisés dans les éoliennes ont besoin d'une quantité importante de puissance réactive, surtout pendant la phase d'excitation (démarrage).

S'il n'y a pas assez des sources de puissance réactive dans les SEH et une ou plusieurs éoliennes démarrent, l'augmentation soudaine de la consommation de puissance réactive provoque des creux de tension et le système décroche. D'autres sources de perturbations pouvant générer des creux de tension sont les courts circuits. Ceux-ci peuvent provoquer l'effondrement des SEH, mais aussi une phase de ré-excitation des générateurs asynchrones connectés au système.

Une autre perturbation qui peut poser des problèmes est la surtension. Une surtension peut être causée par un court-circuit, l'arrêt d'une charge importante ou la connexion d'un banc de condensateurs.

Un inconvénient majeur dans un SEH connecté en réseau triphasé isolé est le déséquilibre de tension entre les phases. Un récepteur électrique triphasé déséquilibré ou de récepteurs monophasés déséquilibrés alimentés par un réseau isolé triphasé peuvent conduire à des déséquilibres de tension. Ces déséquilibres provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements supplémentaires dans les machines tournantes à CA.

Du point de vue de la continuité de la production et de la qualité de l'énergie, les facteurs pouvant affecter le fonctionnement d'un SEH sont résumés ci-après :

- Les variations de la charge à long terme : les régions isolées avec des petits réseaux électriques peuvent subir des changements rapides dans leurs besoins en électricité (généralement, la demande augmente).
- Les variations de la charge à court terme : en général, la demande en électricité varie beaucoup sur des intervalles de temps assez courts, de l'ordre de quelques minutes.
- Des valeurs minimales sont suivies par des pics.

- Les ressources d'énergie renouvelable : les ressources, comme le vent et le soleil, sont stochastiques par leur nature, ont des caractéristiques locales et sont très difficiles à prédire.
- Les perturbations du réseau : les défauts, tels que courts circuits, peuvent non seulement arrêter les systèmes, mais aussi, au pire des cas, détruire certains composants.

I.8.1 Commande des SEH

Le problème principal dans la commande de SEH est de pouvoir fournir l'énergie demandée par la charge, malgré les grandes variations de l'énergie produite, tout en maintenant la fréquence et la tension du bus à CA dans des limites acceptables. Les variations de la production sont causées par la nature stochastique des ressources renouvelables.

Deux aspects principaux doivent être pris en compte dans la commande du SEH :

1. La stratégie de fonctionnement, qui implique des décisions liées au flux d'énergie à l'échelle de plusieurs heures ou jours et des actions pour améliorer le fonctionnement du système.
2. La qualité de l'énergie, à l'échelle des secondes ou millisecondes. Cela concerne la stabilité de la fréquence et de la tension, les protections, etc.

I.8.2 Stratégie de fonctionnement

La stratégie de fonctionnement est un algorithme qui permet au système la supervision d'un SEH de décider combien et quels générateurs faut mettre en marche, quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, si disponible [13], [17].

Le fonctionnement d'un SEH dépend des paramètres suivants :

- Le profil de charge : les variations diurnes, les variations saisonnières, les pics et les creux, etc.
- Les caractéristiques des ressources renouvelables : les valeurs moyennes, l'écart type, la fréquence des événements, les valeurs extrêmes, les variations diurnes et saisonnières, etc.
- Les caractéristiques des générateurs classiques : le type de carburant, les limites de fonctionnement, etc.

- La configuration du système : le nombre et les types de composants (les sources d'énergie renouvelable, les sources classiques, les charges contrôlables, les types de stockage, les convertisseurs de puissance, etc.)
- Les normes de qualité de l'énergie : les exigences en ce qui concerne les variations de la fréquence et de la tension.

Par conséquent, certaines stratégies de fonctionnement peuvent être plus efficaces dans des applications particulières, en fonction des objectifs du système et les caractéristiques présentées ci-dessus. Une brève description de quelques stratégies de fonctionnement est donnée ci-après.

I.9 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale des systèmes hybrides. Tous les composants ont été introduits afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes. Afin de faciliter la conception, nous avons aussi mis en valeur les avantages, les inconvénients et les limites d'utilisation de ces systèmes.

CHAPITRE

II

Chapitre II

Besoins Énergétique d'un Habitat

II.1 Introduction

Depuis son apparition jusqu'à nos jours, l'homme a cherché à accroître son confort. Cela n'a pas épargné le bâtiment. Avec l'avancée des technologies, ces exigences se sont accrues et se sont accompagnées d'un accroissement régulier des consommations énergétiques sans nécessairement maîtriser l'impact environnement.

Il est aujourd'hui plus que nécessaire de réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment, tant au niveau du neuf que de l'existant, et de substituer aux énergies fossiles des énergies renouvelables. Pour cela, il faut moderniser les méthodes de conception et de rénovation des habitats en intégrant une démarche de qualité environnementale. L'objectif à l'horizon 2050 est le bâtiment à énergie positive (BEPOS), c'est-à-dire un bâtiment pouvant produire plus d'énergie qu'il n'en consomme. Les bâtiments ont des besoins énergétiques qui se répartissent sur trois postes :

- Chaleur : chauffage, production de l'eau chaud sanitaire (ECS) ;
- Froid : rafraîchissement ou refroidissement des locaux, conservation des aliments ;
- Electricité : utilisations captives de l'électricité (éclairage, électroménager, audiovisuel et divers auxiliaires tels que brûleurs, pompes, ventilateurs,) [52].

II.2 Maison à Energie Positive (MEP)

Parmi les nombreux concepts de maisons performantes, la maison à énergie positive est parmi les plus récents [53]. En raison de son haut niveau d'exigence, aucune réglementation et aucun standard ne l'ont encore intégré et sa définition n'est donc pas encore clairement établie. Identifier les spécificités de ce concept, et en proposer une définition est nécessaire. Il passe notamment par l'analyse des principaux concepts des maisons performantes existantes [54].

II.2.1 Les concepts de maisons performantes

Les maisons dites « performantes » sont associées, contrairement aux maisons plus ordinaires, à des préoccupations environnementales, en particulier vis-à-vis de leurs besoins énergétiques. Ces

différents concepts se différencient par leurs performances énergétiques de plus ou moins haut niveau [55].

- **La maison à basse consommation « LowEnergy House »** : Les consommations en énergie de ce type de maison sont plus faibles que les maisons ordinaires, sans toutefois inclure de moyen de production d'énergie.
- **La maison passive « Passive House »** : Cette maison présente des consommations en énergie très faibles. Les apports d'énergie dits « passifs » comme l'énergie solaire ou l'énergie dégagée par les appareils internes à l'habitat suffisent, combinés à des systèmes de ventilation, à assurer une température suffisante dans l'édifice. Ce concept associe également à ces économies d'énergies, une réduction de la consommation électrique.
- **La maison zéro énergie « ZeroEnergy House »** : Ce type de maison utilise des moyens de productions d'énergie locaux, qui suffisent à fournir la quantité d'énergie nécessaire. La maison étant à très faible consommation, le bilan énergétique annuel est donc nul.
- **Le bâtiment autonome « Stand Alone House »** : Son apport d'énergie ne dépend d'aucune source extérieure, car toute l'énergie nécessaire est produite sur place. Le principe est similaire à la maison « zéro énergie », à la différence près que le bilan énergétique d'un bâtiment autonome est nul à tout instant, et non pas de façon globale sur une année.

Reste le concept du bâtiment à énergie positive, détaillé ci-après.

II.2.2 Définition d'une Maison à Energie Positive

Il n'a pas été possible de tirer de la littérature une définition claire, rigoureuse et unique de ce concept. La plus part des définitions rencontrées se rapportent aux maisons zéro énergie et demeurent très variées et assez peu précises [56]. La définition présentée ici a été proposée par [54] : « Sur une année donnée de sa phase d'exploitation, un bâtiment assurant un usage résidentiel ou tertiaire pour lequel il est conçu est à « énergie positive » si et seulement si l'énergie totale exportée est supérieure à l'énergie totale importée par le bâtiment. Le bilan intègre aussi les parties annexes du bâtiment lorsqu'elles participent aux fonctions pour lesquelles il est conçu (local technique, cave, garage, etc.) » On peut aussi définir les maisons à énergie positive, tous simplement et comme leurs nom l'indique, des maisons qui produisent plus d'énergie qu'elles n'en consomment.

II.3 Techniques utilisées dans une maison à énergie positive

Dans l'ensemble des maisons performantes, les habitats à énergie positive sont bien sûr ceux qui exigent le plus haut niveau de performances. Il existe néanmoins un certain nombre de solutions techniques éprouvées, et qui pourront constituer une maison à énergie positive. Ceux-ci reprennent donc les principes des maisons passives, mais sont complétés par éléments de production d'énergie [55].

Isolation thermique : Une isolation thermique haute performance est essentielle dans un bâtiment à énergie positive. Celle-ci présente plusieurs avantages, le plus évident, est de conserver la chaleur en hiver et l'air frais en été au sein de l'habitat, en économisant l'énergie nécessaire au chauffage ou au rafraîchissement des pièces.

L'étanchéité à l'air : Pour un bâtiment à énergie positive, une excellente herméticité à l'air est nécessaire, car une faille perturberait toute l'efficacité de l'isolation et de la ventilation des locaux.

La ventilation contrôlée : Le renouvellement de l'air, indispensable au bien-être et au confort dans une habitation, présente de nombreux avantages (hygiène, humidité, confort).

L'énergie solaire passive : L'énergie solaire, captée par les parties vitrées, est une énergie extérieure indispensable au fonctionnement des habitations à énergie positive. Les surfaces vitrées dépendent donc de l'orientation du bâtiment : 40% à 60% de surface vitrée sur la façade Sud, 10% à 15 % sur la façade Nord, et moins de 20% sur les façades Est et Ouest.

Construction compacte : La compacité peut jouer un rôle important dans le gain d'énergie de chauffage : la compacité d'un bâtiment est le rapport entre surface thermo-conductrice et volume à chauffer.

Limitation des consommations d'énergie des appareils ménagers : De nombreuses économies d'énergies peuvent être faites dans le choix d'appareils électroménagers adéquats. Parmi les plus énergivores, on trouvera les lave-vaisselles et lave-linges, fours ou réfrigérateurs.

Moyens de production d'énergie : Pour une maison à énergie positive, la consommation globale d'énergie doit être plus faible que l'énergie qu'elle produit. Il est donc nécessaire d'associer aux techniques de réduction de consommation d'énergie, des moyens de production d'électricité et

de chaleur, ainsi que des infrastructures adaptées pour stocker et transporter ces énergies. Ce type de maison pourra donc accueillir :

- Des modules solaires photovoltaïques installés sur le toit ou sur les façades fortement exposées au soleil, qui permettent de produire de l'électricité.
- Des capteurs solaires thermiques qui transmettent l'énergie solaire reçue à un fluide caloporteur, pour produire de la chaleur.
- Des aérogénérateurs comme les technologies micro-éoliennes pour produire de l'électricité.
- Utilisation de l'énergie géothermique pour récupérer de la chaleur, en utilisant souvent l'eau comme véhicule thermique.
- Utilisation de la biomasse (chaudière à cogénération biomasse fonctionnant à partir de bois ou d'huile par exemple) pour produire de l'électricité et de la chaleur.

II.4 Contexte énergétique algérienne

Le Ministère de l'Energie et des Mines (MEM) est en charge du secteur de l'énergie et des mines en Algérie. Le secteur électrique Algérien est régi par la loi du 05 février 2002 relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisation qui consacre l'ouverture du marché de l'électricité à la concurrence et à l'investissement privé. Une restructuration du secteur a été opérée avec comme résultat la création de la commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG) et la modification des statuts de l'opérateur historique SONALGAZ. Le décret présidentiel n° 02-195 a transformé la Société Algérienne de l'Electricité et du Gaz en une société par actions (sonelgaz SPA). Aujourd'hui, 100% du capital de la sonelgaz appartient à l'état [57].

II.5 Problématique liée aux pics de consommation

Le problème majeur de l'exploitation du réseau électrique est donc de maintenir, en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle d'énergie électrique, celle-ci ne peut pas être stockée en grande quantité. Les paramètres influençant la consommation d'électricité sont essentiellement la météorologie et l'activité économique. Chaque fois que la température baisse d'un degré

Eclairage, chauffage, cuisson, téléphone, informatique, santé..., l'électricité est aujourd'hui présente dans toutes les activités de la vie quotidienne.

II.6 Le secteur du bâtiment : Principal consommateur énergétique dont la consommation ne cesse de croître

L'énergie est à l'heure actuelle omniprésente dans l'activité humaine tant l'ensemble de vie humaine quotidienne est dépendant d'objets qui requièrent de l'énergie transformée pour fonctionner et aussi pour les fabriquer. L'accès à l'énergie et la production d'énergie, qui provient en grande partie des énergies fossiles émettrices massives de CO₂ (principale gaz à effet de serre identifié), constituent dès lors des problématiques énergétiques auxquelles doivent se confronter les sociétés actuelles car celles-ci impliquent des dimensions environnementales, économiques et politiques d'envergure. Dans ce cadre, la réduction de la consommation énergétique est indisponible [58].

II.6.1 Position du bâtiment dans la maîtrise de l'énergie

Le secteur du bâtiment en Algérie (le résidentiel et le tertiaire) consomme plus de 40% du total de l'énergie. Les perspectives de développement du parc de logement conduiront à un accroissement exponentiel de cette consommation énergétique. Ce dernier est considéré avec le transport, comme étant le plus grand gisement d'économies et de modulation d'énergie.

II.6.2 Impact du secteur bâtiment

L'étude de la répartition de la consommation de l'énergie électrique par secteur en Algérie met en évidence que le secteur du bâtiment est celui sur lequel il est le plus intéressant de travailler puisqu'il est le plus gros consommateur d'énergie électrique. La consommation électrique du secteur résidentiel a atteint Ktep (tonnes équivalent pétrole) (figure II.1), elle représente 41% de la consommation totale d'électricité. Ainsi, il représente le premier secteur grand consommateur d'énergie électrique au niveau national.

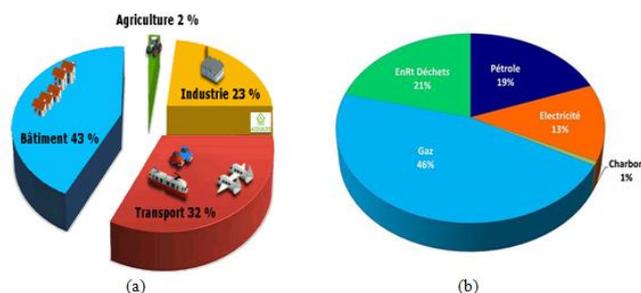


Figure II.1 : (a) consommation finale par secteur d'activité ; (b) consommation du secteur résidentiel par type d'énergie

La croissance du nombre de bâtiments est un facteur explicatif de la croissance de la consommation d'électricité du secteur tertiaire. Selon l'Observatoire de l'Energie, la hausse de la consommation électrique dans le secteur résidentiel/tertiaire est principalement due à l'accroissement et la multiplication du nombre d'appareils électroménagers présents dans chaque foyer, notamment pour les produits bruns (TV, lecteurs, enregistreurs DVD, Hi-fi, décodeurs, téléphonie, console de jeux, ordinateurs...). Malgré l'impact de la crise économique, la consommation du secteur résidentiel a continué à croître de plus de 2% par an [59]. Le principal ressort de cette évolution est principalement le développement du chauffage électrique.

Concernant la répartition des émissions de gaz à effet de serre liées à la combustion de l'énergie, on s'aperçoit que le secteur industriel est celui qui est le plus contributif en 2005 avec 47% des 185 Mt CO₂ émises en Algérie (figure II.2). Le secteur du bâtiment n'arrive qu'en troisième position avec 16% des émissions après le secteur industriel et le secteur de transport mais reste un secteur très fortement contributif [60].

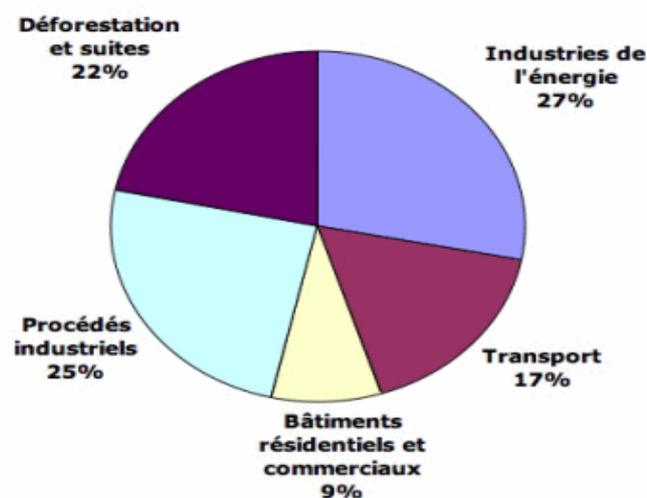


Figure II.2 : bilan des émissions de CO₂ par secteur

La politique énergétique préconise l'accroissement de la contribution des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national. L'objectif est d'atteindre une contribution des énergies renouvelables de l'ordre de 6 % dans le bilan national à l'horizon 2015 à travers les filières, photovoltaïques, thermique solaire et éolienne. Cette politique pour réduire les consommations énergétiques et les émissions associées dans l'ensemble des secteurs économiques et notamment dans le secteur du bâtiment.

Le secteur résidentiel reste ainsi un secteur en forte croissance même si les actions de maîtrise de la demande engagées aussi bien au niveau européen que français devraient contribuer à réduire progressivement la croissance des consommations d'énergie de ce secteur. En considérant l'importance de la consommation du secteur du bâtiment, on constate qu'il est nécessaire de favoriser la réduction et la maîtrise de la consommation énergétique dans le secteur résidentiel et tertiaire. L'état se fixe comme objectif de réduire les consommations d'énergie du parc des bâtiments existants d'au moins 38% d'ici à 2020. A cette fin, il prévoit la rénovation complète de 400 000 logements chaque année à compter de 2013. L'article 4 de la loi Grenelle renforce la réglementation thermique dans le bâtiment neuf, alors que l'article 5 se concentre sur les bâtiments existants, et prend comme objectif de diminuer au moins de 28% la consommation énergétique dans le bâtiment à l'horizon de 2020. Cela s'est introduit par la réglementation thermique 2012. D'un point de vue technique, cela induit un usage plus étendu de la modélisation car elle est un moyen indispensable pour concevoir des bâtiments performants et mettre au point des systèmes de gestion énergétique [61].

Pour monter dans l'échelle du logement économe, et passer des « bâtiments à basse consommation » en 2012 aux « bâtiments à énergie positive » en 2020 quand la consommation d'énergie primaire consommée est inférieure à la quantité d'énergie renouvelable produite sur l'année, les axes de développement d'efficacité énergétique concernent :

- La climatisation et le chauffage
- L'éclairage naturel avec exploitation de la lumière du jour par des équipements appropriés, et l'utilisation des lampes à basse consommation
- Les appareils de basse consommation (utiliser des appareils électroménagers à haute performance énergétique)
- L'isolation thermique
- Les systèmes de gestion énergétique permettant non seulement de résoudre les problèmes d'adéquation, production, consommation d'énergie mais aussi de réduire la consommation en améliorant l'adaptation des besoins énergétiques aux usages.

II.7 Caractéristiques d'une maison à basse consommation d'énergie

II.7.1 Une conception bioclimatique de l'habitat

a) L'orientation de la maison

L'objectif est de récupérer au maximum la chaleur et la lumière du soleil en hiver et de réduire ces mêmes contributions en été. L'exposition Est-Ouest n'est pas recommandée [62]. À l'Ouest, le bâtiment accumule la chaleur en raison de l'exposition directe du soleil l'après-midi et engendre des surchauffes en été.

L'exposition Nord est la partie la plus froide. Il faudra aménager des espaces peu utilisés au Nord afin de réduire l'impact du froid, de minimiser les diminutions de température du bâtiment et contribuer aux économies d'énergies et au confort des habitants. Le garage, les escaliers, les couloirs, etc. sont des pièces peu utilisées et à faible température : elles constituent des zones tampons idéales.

L'exposition Sud est souvent la plus intéressante pour respecter le confort d'été et récupérer les apports solaires gratuits l'hiver. En hiver, le soleil très bas réchauffe les parois de la maison qui préservent la chaleur, les rayons solaires pénètrent à l'intérieur par les fenêtres, et assurent ainsi un chauffage de base. C'est au sud que l'on disposera les pièces de vie. L'orientation vers le Sud est également favorable aux systèmes à énergie solaire (capteurs solaires thermiques pour le chauffage et l'eau chaude, panneaux photovoltaïques pour la production d'électricité). En été, le soleil arrive verticalement et n'entrera pas dans la maison, dont les baies peuvent être protégées par une avancée (balcon ou brise-soleil par exemple) ou des stores à lamelles orientables.

b) La forme du bâtiment

L'architecture d'une maison a un impact très fort sur la consommation d'énergie. Le rôle de l'architecte est très important. Plus un bâtiment est compact, moins il consomme de l'énergie. C'est pour cela que pour une bonne habitation, le rapport des surfaces des parois en contact avec l'extérieur sur la surface habitable doit être faible. La forme sphérique est la forme qui possède le rapport surface sur volume le plus petit. Elle est donc parfaite pour réduire les pertes thermiques de l'enveloppe du bâtiment. Néanmoins, dans un souci d'architecture traditionnelle, on utilise le cube qui se rapproche le plus de la sphère. Un bâtiment compact consommera donc moins qu'un bâtiment en L ou à plusieurs étages [63].

II.7.2 Une forte isolation thermique

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. Les normes 2012 de résistance

thermique (en $m^2.k/W$) sont les suivantes : $R \geq 8$ pour les combles, à 4 pour les murs et les sols [64], [65].

Que le système constructif soit d'ossature de bois, de parpaings ou de briques, il faut isoler toutes les parois. L'isolation sera thermique, mais aussi acoustique [66], [67].

Isolation des murs :

Par l'intérieur : Il existe deux méthodes différentes : le doublage collé qui consiste simplement à coller sur le mur l'isolant associé à une plaque de plâtre ou l'ossature métallique qui consiste à glisser entre un mur et une structure métallique faite de rails et de montants l'isolant.

Par l'extérieur : On enveloppe la maison d'un matériau isolant qu'on recouvre ensuite d'un revêtement extérieur tel que des enduits, bardages etc. pour protéger des intempéries.

Isolation répartie : Ce système n'est possible qu'avec certains modes de construction où la structure du bâtiment présente lui aussi des performances thermiques.

Isolation des combles et plafonds : L'isolation du toit est essentielle pour une bonne isolation thermique, car on considère que c'est par le toit que s'échappe 30 % de la chaleur du bâtiment [68]. Il faudra isoler les combles perdus (isolant en "vrac" afin de former un matelas continu et homogène) et les combles aménagées (il existe deux techniques d'isolation : par l'intérieur ou par l'extérieur, grâce au sarking, cette technique consiste à poser un pare-vapeur horizontalement et parallèlement à la gouttière du bâtiment puis poser jointivement un isolant par-dessus).

Isolation des sols : Pour isoler le plancher on opte pour du polystyrène expansé, extrudé, de la laine de bois, des isolants projetés, etc. Lorsque le plancher est sur vide sanitaire on fabrique un plancher à isolation mixte fait d'un entrevous en polystyrène et d'un isolant sous chape.

II.8 La production d'eau chaude sanitaire

II.8.1 Consommation des chauffe-eau

La consommation des chauffe-eau observés durant des campagnes de mesure sur de longues périodes varie dans des proportions très importantes. Ceci est dû principalement :

- au nombre de personnes dans chaque logement,

- à la différence de leurs besoins en eau chaude sanitaire (douche, baignoire, etc),
- à la qualité d'isolation du ballon,
- à la température de stockage de l'eau (figure II.5),
- à la position du ballon dans l'habitation (dans ou hors volume chauffé, à proximité ou loin des lieux de puisage),- etc.

En moyenne, tous ballons confondus et sans distinction de taille de qualité ou d'usage, la consommation d'électricité moyenne observée pour les ballons est de 2.365 kWh/an. Cette consommation peut varier de 700 à 5.600 kWh/an (figure II.4).

La consommation des chauffe-eau a deux origines :

- les volumes d'eau soutirés par les usagers,
- l'ensemble des pertes, celles du ballon mais aussi celles de la distribution d'eau

L'isolation moyenne des ballons s'est, quant à elle, améliorée ces dernières années. Mais les ballons anciens, ou les ballons bas de gamme, ont des niveaux d'isolation dérisoires (20 ou 25 mm de mousse de polyuréthane). Sur certains ballons la consommation d'entretien (c'est à dire l'énergie nécessaire au maintien en température du ballon, en dehors de tout puisage) atteint 3,5 ou 4,0 kWh/j, soit 1.300 à 1.500 kWh/an. Pour ces ballons de mauvaise qualité, les pertes sont aussi importantes que la production de l'eau chaude consommée.

II.8.2 Comment réduire les besoins du poste « eau chaude sanitaire » ?

En construction neuve les règles à respecter pour réduire la consommation de la production ecs sont simples :

1 - réduire l'énergie nécessaire à la production ecs c'est d'abord réduire les consommations d'eau chaude. Pour cela on veillera à utiliser différents matériels hydroéconométrès efficaces :

- en tête de chaque logement, on utilisera d'abord un réducteur de pression si la pression du réseau urbain dépasse 3 bars. Cela évitera des débits inutilement très élevés lors des puisages,
- au nez des robinets des éviers et des lavabos (mais surtout pas des baignoires !) on utilisera des limiteurs de débit autorégulés (c'est à dire capable de maintenir un débit de consigne même lorsque la pression amont varie (dans certaines limites quand même)). On choisira des modèles dont le débit nominal est très faible, de l'ordre de 4 ou 4,5 l/min. Pourquoi ?

Parce que tous les usages se font aujourd'hui « au fil de l'eau », ce qui est à l'origine des dérives importantes que l'on observe sur les consommations d'eau chaude. Et pour des usages de ce type, la valeur du débit n'importe guère et on peut donc utiliser des limiteurs à très faible débit nominal. Des utilisateurs interrogés sur la pertinence de ces choix les ont validés en affirmant qu'ils étaient tout à fait satisfaits,

- les douchettes utilisées seront de type à économie d'eau. Il en existe plusieurs technologies : douchette à turbulence, à effet Venturi, etc.
- ne plus prévoir que des douches dans la construction des logements et éviter les baignoires. Cela correspond à une réalité sociologique : la baignoire, qui coûte cher, n'est plus guère utilisée. Sa disparition restera en revanche un problème pour le bain des jeunes enfants (eux mêmes dans une baignoire à leur taille généralement placée dans la grande baignoire....).

A l'adresse www.jeconomiseleau.org/inventaire_hydroeconomies.pdf, on trouvera un excellent document fournissant toutes les informations techniques pour choisir des matériels hydroéconomiques. Description du fonctionnement de chaque technologie, fabricants, prix, etc.

2 - placer le ballon dans le volume chauffé, et faire en sorte qu'il soit très proche (c'est à dire moins de 2 mètres) des points de puisage (en général la salle de bains et la cuisine),

3 - mettre en place un ballon à très haut niveau d'isolation. La constante de refroidissement du ballon ne doit pas être supérieure à 0,15 Wh/°C.l.jour. Même avec ces performances, un ballon de 200 litres maintenu à 60 °C aura encore une consommation d'entretien de 1,25 kWh/j, soit 450 kWh/an, ce qui est beaucoup trop. On peut aussi mettre en place le ballon le mieux isolé du marché, puis créer un petit placard autour et le remplir de laine minérale,

4 - limiter la température de stockage à 60°C,

5 - calorifuger si possible la distribution d'ecs intérieure au logement avec un isolant équivalent à 20 mm de fibres minérales.

La figure II.3 présente la production d'eau chaude.



Figure II.3 : La production d'eau chaude sanitaire

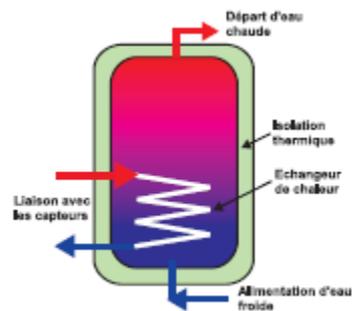


Figure II.4 : Le «ballon» est installé à l'intérieur de la maison. Il sert à stocker l'eau chauffée par les capteurs. Ces deux éléments sont reliés par un circuit hydraulique.

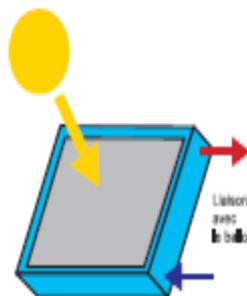


Figure II.5 : Les «capteurs» sont posés dehors et permettent de capter la chaleur du rayonnement solaire afin de chauffer l'eau.

II.9 Quelques exemples de profils de consommation

L'étude des systèmes hybrides éoliens photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel nécessite la connaissance de la consommation en électricité de ce dernier. Pour cette raison, nous

avons modélisé deux profils de consommation pour un foyer type de 120m² avec 4 personnes, hors cuisson, eau chaude sanitaire et chauffage du logement. Le premier a été développé suite à une estimation des besoins énergétiques de l'habitat. le deuxième a été obtenu par des acquisitions réelles.

II.9.1 Modélisation d'un profil de consommation type par estimation des besoins énergétiques de l'habitat

La consommation électrique des appareils a été déterminée à l'aide d'ouvrages [69], de sites internet spécialisés [70] ainsi que des fiches techniques de certains produits électroménagers (hotte aspirante, aspirateur,...). Toutes les charges sont alimentées en 220V AC donc l'utilisation de convertisseurs DC-AC s'impose. En entrée du convertisseur, la tension aux bornes des batteries est de 48 V continue (tension de sécurité) alors qu'en sortie, la tension alternative vaut 220V, 50Hz.

Le nombre d'heures de consommation est déterminé en fonction des conditions climatiques du site choisi et du mode de vie de la famille occupant l'habitat. Vous trouverez ci-après les différents usages d'un habitat résidentiel.

a) Eclairage :

L'éclairage dépend du lever et du coucher du soleil, de l'activité des membres de la famille (exemple : levé 7h, couché 23h) ainsi que leur présence à la maison durant la journée (exemple partir travailler de 8h à 18h pendant la semaine, être présent le weekend).

b) Production de froid :

Pour le réfrigérateur, le nombre d'heures de fonctionnement du compresseur dépend de la température environnante. Pour cette raison, nous supposons que durant la période hivernale (De Novembre à Février) le compresseur fonctionne moins longtemps que pendant la période estivale « moyennement » chaude dans le site (Juin, Juillet, Aout, Septembre).

c) Cuisson :

La cuisson est assurée par du gaz naturel ou par du propane. Une micro-onde est utilisée pour chauffer les repas si nécessaire. Il est un peu plus sollicité en hiver qu'en été. La cuisine est équipée d'une hotte aspirante les mauvaises odeurs.

d) Ventilation :

Pour éviter le confinement, préserver la qualité de l'air et éliminer l'humidité et les divers polluants, l'habitat résidentiel est équipé d'un système de ventilation (VMC) simple flux.

e) Electroménager :

L'habitat résidentiel est bien équipé pour fournir un confort satisfaisant à ses occupants : on y trouve une machine à laver, un lave-vaisselle, un aspirateur et plusieurs autres appareils électrodomestiques (sèche-cheveux, grille-pain, mélangeurs, robots de cuisine, etc.).

f) Multimédia :

Dans l'habitat, on trouve une télé, une chaîne Hi-Fi et un PC connecté à internet via une ligne ADSL.

g) Eau Chaude Sanitaire (ECS) :

Des capteurs solaires assurent 90% de la production ECS (Eau Chaude Sanitaire). L'énergie électrique peut être utilisée pour soutenir le chauffage solaire de l'eau pendant la période hivernale.

h) le chauffage

Le chauffage est le poste de consommation énergétique le plus important dans une maison classique. Dans une maison BBC, les consommations peuvent encore représenter jusqu'à 20 ou 30 kWh/m²/an, soit entre 40 et 50 % des consommations totales. Il est donc primordial de bien choisir le système de chauffage de sa maison et de trouver un dispositif adapté à ses usages. On distingue deux stratégies de chauffage : le chauffage central et le chauffage pièce par pièce [71].

Pour chaque charge, nous avons calculé l'énergie quotidienne nécessaire à produire en Ah/j.

Voici un exemple explicatif des calculs :

Exemple de calcul : pour l'éclairage de la cuisine :

Puissance consommée en watts : 20 (ampoules Basse Consommation)

Nombre d'heures par jour : 4h

Energie consommée exprimée en Wh/jour : $E_c = 4 * 20 = 80Wh$

Energie consommée en Ah/jour à 48V : $E_c = 4 \cdot 20 / 48 = 1.6667 \text{ Ah/jour}$

Suite à l'estimation des charges électriques de l'habitat, nous avons établi un profil de consommation annuel type en considérant les hypothèses suivantes :

• **Pendant un jour de la semaine**, de minuit au lever de la famille à 7h. La consommation est faible (150W). Elle est principalement due à l'alimentation d'appareils divers tel que de L'ADSL, téléphones, réveils, VMC, frigo, etc. A partir de 7h la famille se lève, la consommation augmente en fonction des activités diverses de la famille (toilettes, préparer le petit déjeuner par micro-ondes etc.). A 8h la famille quitte la maison. La consommation électrique chute en conséquence. On suppose qu'elle avoisine toujours les 150W avant le retour de la famille à 12h. Pendant le déjeuner, la consommation électrique subit une importante croissance en fonction des activités de cuisson (micro-onde, mélangeur, hotte de la plaque de cuisson) et de pause déjeunée (télévision, radio,...). A 14h, la famille repart de la maison et la consommation rejoint les 150-300 W (selon la saison) jusqu'à la rentrée de la famille à 18h. Cette dernière augmente alors jusqu'à (19h30, 20h) heure du dîner. Par la suite, la consommation tend vers une valeur de l'ordre de 600-700 W qui corrèle avec des consommations énergétiques diverse (télé, HIFI, PC, ADSL, l'éclairage, ...). A 23h, la famille se couche. La consommation retombe alors pour rejoindre sa valeur minimale (150W).

• **Pendant un jour du weekend**, la famille se lève plus tard vers 8h/9h. Alors, la consommation reste faible à 150W de minuit à cette heure. Puis, elle augmente suite aux activités matinales dans la salle de bain et dans la cuisine comme une journée de la semaine. Par la suite, la famille est supposée rester dans la maison. Ainsi, sa consommation augmente considérablement (vers les 400W) entre 9h et 12h et entre 14h et 18h par rapport à une journée de la semaine. La famille se couche plus tard souvent entre 23h30 et minuit. La figure II.1 représente les différents profils journaliers de consommation établis pour chaque saison.

• **Pendant l'année**, la famille est supposée être présente toute l'année dans la maison. on ne prend pas en considération les congés et les vacances, période relativement réduite par rapport à une année entière. Le profil de consommation annuel est une reproduction du profil journalier en semaine et en fin de semaine tout en respectant les variations saisonnières. Les jours fériés sont pris en compte et considérés comme jour de weekend. Les

jours fériés et les weekends sont considérés en concordance avec le calendrier de l'année 2009.

Au final, la consommation annuelle en électricité s'élève à 3306,435 KWh/an, ce qui semble cohérent du fait que les applications énergétivores (ECS, chauffage, cuisson) sont assurées par d'autres ressources énergétiques.

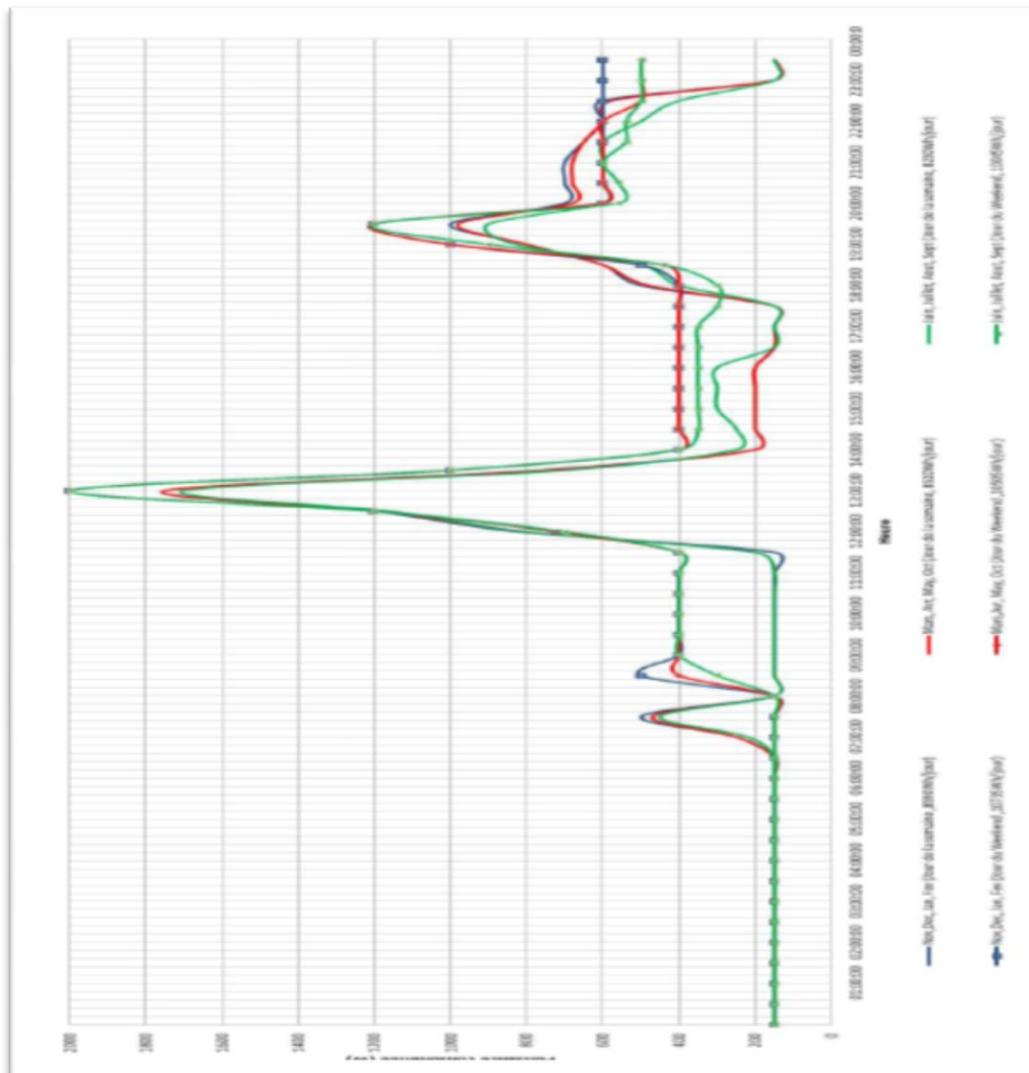


Figure II.6: Profils de consommation journaliers établis pour l'habitat résidentiel considéré en fonction de l'heure et de la saison

II.9.2 modélisation d'un profil de consommation par acquisition de données réelles

Des données de consommation réelles ont été acquises pour une maison de 4 habitants située à la Rochelle sans considération de la cuisson, du chauffage et de l'eau chaude sanitaire comme cela a été indiqué dans le paragraphe précédent.

Les caractéristiques de l'habitat sont récapitulées ci-dessous :

- habitat familial de 120m².
- Nombre de pièces principales : 3 chambres + une cuisine + une salle à manger.
- Equipements à basse consommation : ampoules et appareils électrodomestiques.
- Résidence occupée sept jours par semaine toute l'année.

La figure II.7 montre les acquisitions à la minute de la consommation d'énergie durant un jour de la semaine et un jour pendant le weekend. Elles ont été mesurées avec un analyseur d'énergie en juin afin de neutraliser le chauffage. Pendant une journée de la semaine, la maison est moins occupée par ses habitants. la consommation d'énergie s'élève à 4489 Wh/jour. Lors d'un jour férié ou de fin de semaine, la demande d'électricité augmente de manière significative et atteint 6884,3 Wh/jour.

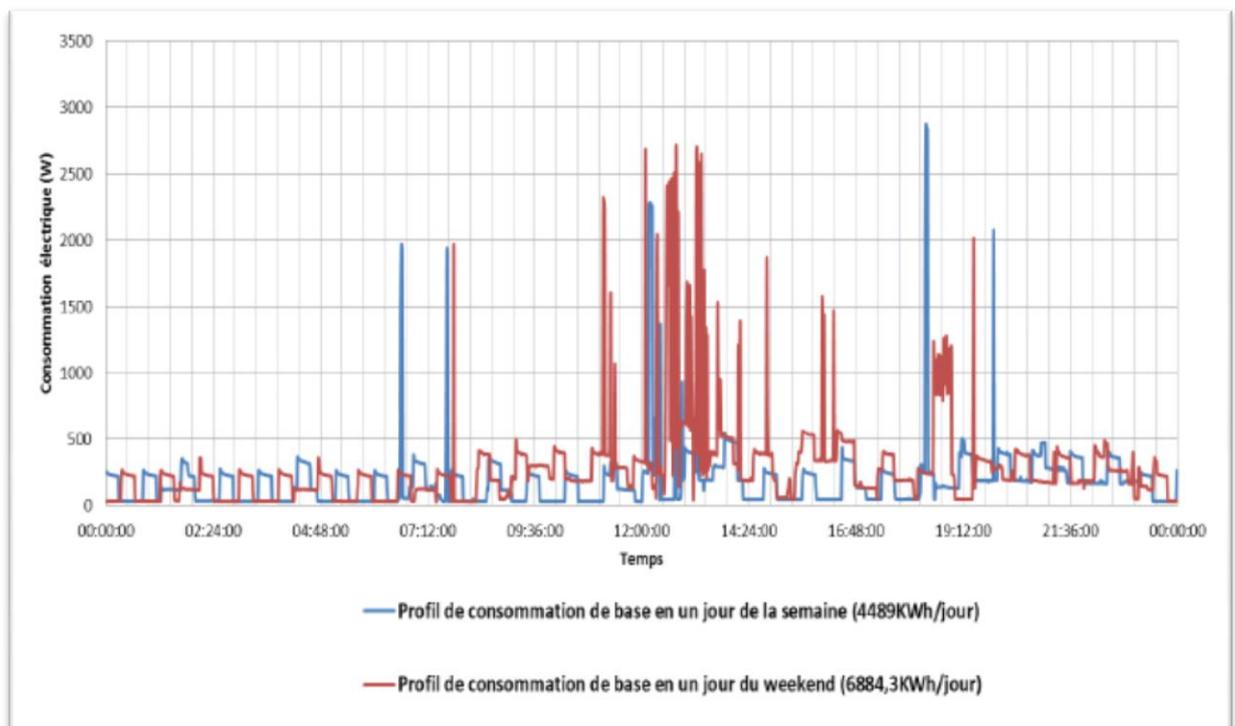


Figure II.7: Profils de consommation journalière de base enregistrés dans l'habitat résidentiel en fonction du temps.

Ces profils ont été extrapolés pour chaque année entière entre 2002 et 2010 en considérant les variations saisonnières de la charge électrique dans l'habitat. Cette extrapolation a été faite par multiplication de ces profils de base par les facteurs de correction illustrés par le tableau II.1. Ces

derniers ont été obtenus grâce aux variations saisonnières (figure II.8) de la charge électrique enregistrées dans un habitat similaire de la région en 2009.

La consommation annuelle de la résidence est alors estimée à 2199 KWh/an en 2009.

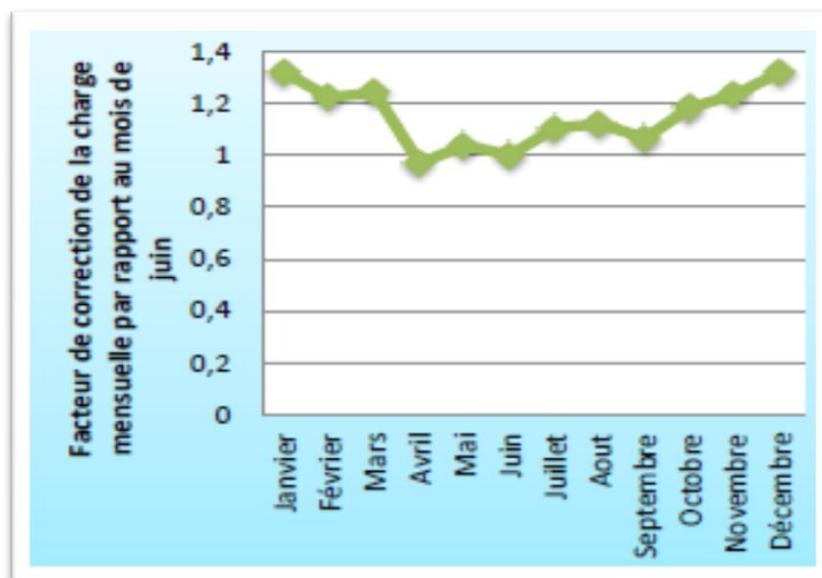


Figure II.8 : Allure de l'évolution de la consommation électrique en fonction des mois représentée par les facteurs de correction de la charge électrique par rapport au mois de juin.

Tableau II.1 : Facteurs de correction de la charge électrique par rapport au mois de juin.

Mois	Consommation dans une maison résidentielle en région Poitou-Charentes (KWh)	Facteurs de correction par rapport au mois de Juin
Septembre	266	1.0391
Octobre	303	1.1836
Novembre	322	1.2578
Décembre	338	1.3203
Janvier	338	1.3203

Février	313	1.2227
Mars	318	1.2422
Avril	248	0.9688
Mai	266	1.0391
Juin	256	1.0000
Juillet	283	1.1055
Aout	287	1.1211
Septembre	273	1.0664
Octobre	303	1.1836
Novembre	316	1.2344

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les besoins énergétiques d'une habitation. Ces besoins sont essentiellement des charges thermiques (chauffage et refroidissement) ainsi que des charges électriques (lampes, équipement électroménagers..). Il y a lieu de concevoir une source d'énergie qui va satisfaire ces besoins. Notre source sera une hybridation de plusieurs types d'énergies.

CHAPITRE

III

Chapitre III

Etude d'un Système Hybride Pour l'Alimentation d'un Habitat

III.1 Introduction

Pour pouvoir satisfaire les besoins énergétiques d'une habitation quelconque, une source énergétique est nécessaire. Pour plusieurs raisons, une seule source s'avère insuffisante. L'ajout d'une ou deux autres sources est nécessaire.

L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés. Concernant l'Algérie, un pays très vaste d'un climat très diversifié, ayant deux grandes zones géographiques distinctes, le Nord méditerranéen et le Sud saharien, peut devenir un bon concurrent dans cette course de recours aux énergies renouvelables.

Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer.

Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle rendu possible grâce à des logiciels très performants. Ces installations hybrides vont connaître, à moyen terme un intérêt certain grâce à leur flexibilité vis-à-vis des sources d'énergie primaires.

L'objectif de ce travail, est l'étude d'une centrale de production électrique hybride, qui combine entre deux sources d'énergies renouvelables (éolienne, photovoltaïque) avec stockage et

un groupe électrogène de secours. Nous avons simulé le système hybride (éolienne – photovoltaïque - groupe diesel) sous le logiciel Matlab-Simulink

III.2 Description d'une centrale hybride

Le système hybride présente un double avantage afin de minimiser les perturbations de l'environnement, grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et une sécurité d'approvisionnement, quelles que soient les conditions météorologiques. Il existe deux types de système de production hybride, système alterné et système parallèle. Le système alterné consiste en association d'un système éolienne, un système photovoltaïque et un groupe électrogène relié par un système de commutation entre les trois permettant d'assurer le passage d'un fonctionnement d'une source à une autre (selon les conditions météorologique jour et nuit), par contre le système parallèle relie les deux sources (éolienne, photovoltaïque) en même temps à la batterie et le groupe électrogène intervient en secours (quand les batteries sont déchargées). Le système choisi dans notre étude, est réalisé de telle sorte à obtenir un fonctionnement parallèle des deux sources (éolienne, photovoltaïque) avec un groupe électrogène de secours, conçu pour l'alimentation d'un site isolé (figure III.1) [72].

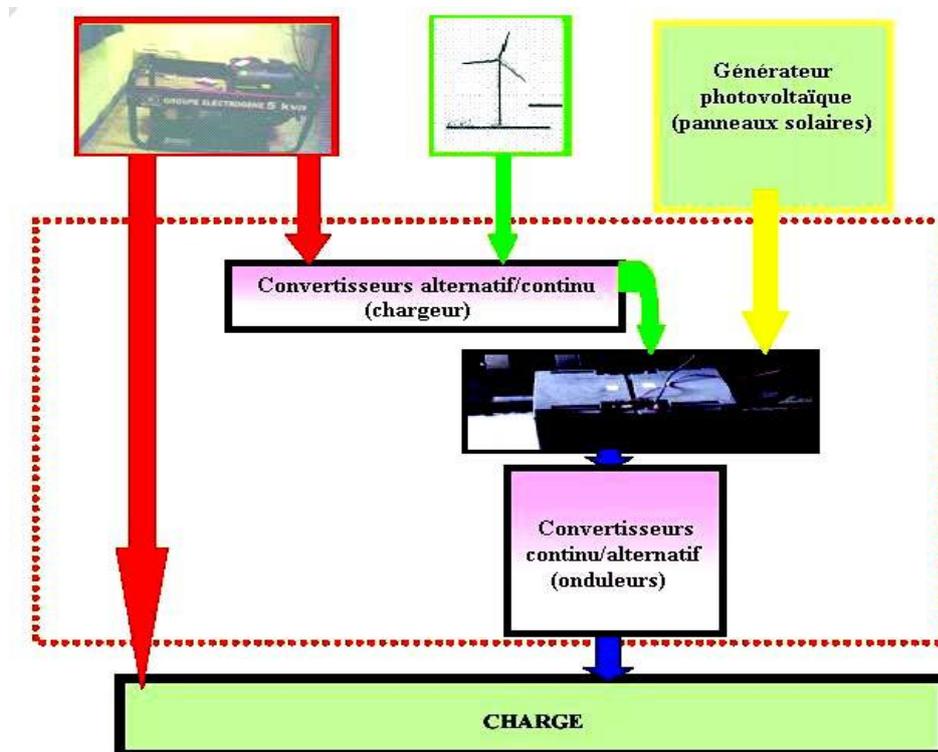


Figure III.1 : Schéma physique de la chaîne de conversion d'énergie électrique hybride (photovoltaïque-éolienne- groupe électrogène)

III.3 Dimensionnement de l'installation hybride

Le dimensionnement de l'installation à étudier sera organisé de la façon suivante: l'étude du potentiel énergétique sur le site choisi, la détermination du profil de charge des consommateurs, le dimensionnement du générateur photovoltaïque, du générateur éolien, du générateur diesel, et le dimensionnement des batteries de stockage. Les données météorologiques dépendent du site choisi à implanter le système.

Dans cette étude, nous avons choisi un système éolien - photovoltaïque associé à un groupe diesel, donc la connaissance et l'estimation des deux sources d'énergies (soleil et vent) doivent être effectuée.

La connaissance exacte du profil de charge de nos consommateurs facilitera la détermination de la taille de nos générateurs. Nous rappelons que notre système hybride est prévu pour l'alimentation électrique d'un site isolé. L'étude du bilan énergétique a pour l'égalité:

Energie générée = Energie consommée

III.4 Modélisation du système hybride

L'objectif est de disposer de modèles suffisamment fiables afin d'effectuer une étude d'optimisation du dimensionnement et de la gestion d'énergie du système complet.

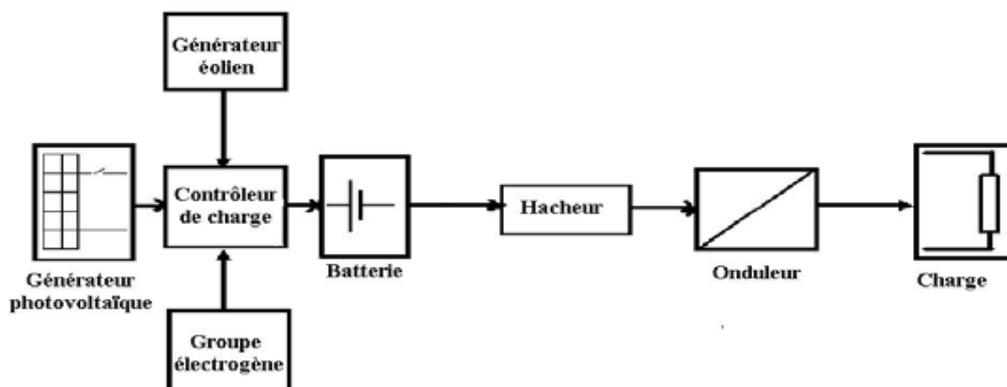


Figure III.2: Schéma d'une installation type d'un système hybride (PV-éolienne-groupe diesel)

III.4.1 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque transforme l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, sous forme de courant continu directement utilisable. Du point de vue technique, on

estime que les systèmes de conversion à énergie solaire sont potentiellement capables de répondre à une grande partie de la demande énergétique mondiale.

La transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque est un des moyens d'exploitation du gisement solaire. Elle est réalisée par des cellules photovoltaïques. Il est à noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans la cellule, ni sous forme chimique, ni sous aucune forme. Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule sous obscurité totale va se comporter comme un composant passif. La cellule solaire ne peut être assimilée à aucun autre générateur classique d'énergie électrique de type continu. Elle n'est ni une source de tension constante ni une source de courant constant. Elle possède des caractéristiques non linéaires dépendant de l'éclairement.

Actuellement, le rendement de conversion d'énergie solaire en énergie électrique est encore faible (le rendement le plus élevé aujourd'hui en laboratoire est de 25%) et sous un ensoleillement nominal de 1000 W/m^2 . Ce faible rendement des sources photovoltaïques a incité les utilisateurs à exploiter le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur PV. Ce maximum est généralement obtenu en assurant une bonne adaptation entre le générateur PV et le récepteur associé. L'adaptation se fait à l'aide de convertisseur statique contrôlé (onduleur) pour différents modes de fonctionnement. Comme la puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible, il est nécessaire de disposer d'associations en série et en parallèle de telles cellules pour obtenir des modules de puissance compatibles avec le matériel électrique usuel. Nous présentons dans ce travail de mémoire quelques modèles mathématiques permettant de calculer la puissance délivrée par un module solaire photovoltaïque.

III.4.1.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge ($2.5\mu\text{m}$). L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m^2 dans l'espace hors atmosphère terrestre. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux prévenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé [73].

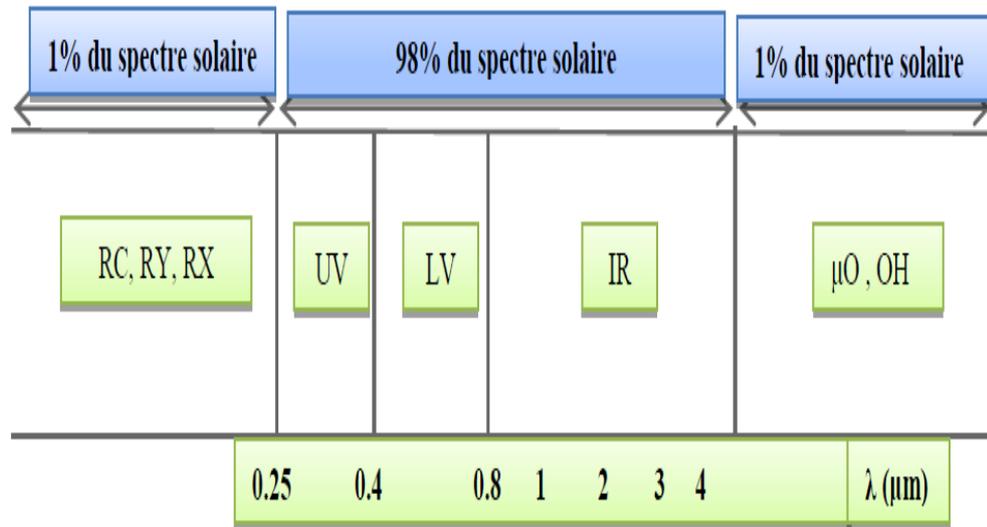


Figure III.3 : Spectre de rayonnement solaire

III.4.1.2 Modélisation du générateur PV

a) Première approche

Le modèle d'essai présenté ci-dessous permet de calculer la puissance maximale fournie par le module, en utilisant la température et l'éclairement solaire incident. Ce modèle a été élaboré et validé expérimentalement par Lu Lin en 2004 [74], [75].

$$P_m = -(a * G + b) T_c + c * G + d \quad (1)$$

P_m : Puissance maximale produite (W) ; a, b, c et d sont des composantes positives qui peuvent être connues expérimentalement ;

T_c : Température de la cellule, qui varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante, selon la relation linéaire suivante :

$$T_c = T_a + \left[\frac{NOCT - 20}{800} \right] G \quad (2)$$

T_a : Température ambiante (K) ;

$NOCT$: Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal Operating Cell Temperature). Elle est définie comme étant la température de la cellule sous certaines conditions définies par l'éclairement solaire (800 W/m²), la distribution spectrale (AM 1.5), la température ambiante (20 °C) et la vitesse de vent (>1m/s) ;

G : Eclairement solaire incident sur un plan incliné (W/m²).

b) Deuxième approche

La puissance produite du générateur photovoltaïque peut être calculée à partir de l'équation suivante [76] :

$$P = \eta * S * N * G \quad (3)$$

S : Surface du module photovoltaïque ; G : Eclairement solaire sur plan incliné (W/m^2) ;

N : Nombre de modules constituant le champ photovoltaïque.

η : Rendement de référence du module sous les conditions standards ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et AM1.5).

$$\eta = \eta_r (1 - \gamma(T_c + T_o)) \quad (4)$$

γ : Coefficient de température ($^\circ\text{C}^{-1}$) déterminé expérimentalement, il est défini comme étant la variation du rendement du module pour une variation de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ de la température de la cellule. Les valeurs typiques de ce coefficient se situent entre 0.004 et $0.006 \text{ }^\circ\text{C}$ [77].

η_r : Rendement de régulateur (%)

L'intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur dans les conditions standard (la puissance totale P , la tension en circuit ouvert V_{CO} , le courant de court-circuit I_{CC} et la surface du panneau).

c) Troisième approche

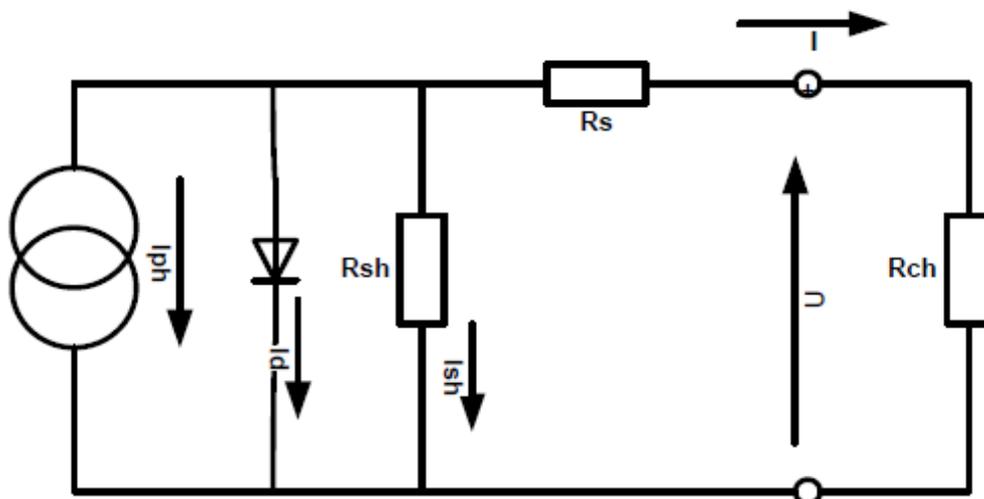


Figure III.4: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Ce modèle mathématique fait usage des spécifications des modules photovoltaïques données par les fabricants. Il s'agit donc une méthode très simple pour connaître la puissance produite par les modules photovoltaïques [77], [78].

$$I_m = I_{CC} \cdot \{1 - [c_1 \cdot \exp(\frac{V_m}{C_2 \cdot V_{co}}) - 1]\} + \Delta I \quad (5)$$

C_1 et C_2 sont des paramètres qui peuvent se calculer par les relations suivantes :

$$C_1 = (1 - \frac{I_{mp}}{I_{cc}}) * \exp(-\frac{V_{mp}}{C_2 * V_{co}}) \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{V_{mp}}{V_{co}} - 1 / \ln(1 - \frac{I_{mp}}{I_{cc}}) \quad (7)$$

I_{mp} : Courant du module PV en parallèle

V_{mp} : Tension du module PV en parallèle

ΔI : est un paramètre qui dépend de la différence de température et de l'éclairement solaire. Il est défini par l'expression :

$$\Delta I = \alpha_0 * (\frac{G}{G_0}) * \Delta T + (\frac{G}{G_0} - 1) * I_{cc} \quad (8)$$

$$\Delta T = T_c - T_0 \quad (9)$$

α_0 : Coefficient de variation linéaire du courant de court-circuit

La tension V_m du module est déterminée par l'équation suivante :

$$V_m = V_{mp} [1 + 0.0539 \log(\frac{G}{G_0})] + \beta_o * \Delta T - R_s * \Delta I \quad (10)$$

β_o : Paramètre du module photovoltaïque

La résistance série R_s est due à la contribution des résistances de base, du front de la jonction et des contacts face avant et arrière.

La puissance optimale à la sortie d'un module est déterminée par :

$$P_m = I_m * V_m \quad (11)$$

III.4.1.3 Avantages et inconvénients des PV [79], [80], [81]

Avantage :

Les avantages des générateurs photovoltaïques sont plusieurs et leur application se développe d'un moment à l'autre, parmi eux on site :

- ✓ une haute fiabilité ou l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ✓ leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- ✓ le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. il ne nécessite ni combustible, ni un transport, ni un personnel hautement spécialisé.
- ✓ ils sont recyclables, les matériaux utilisés pour leur production peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire plus de matériaux.
- ✓ L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments. Les modules solaires peuvent être en façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments.
- ✓ Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- ✓ L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année. Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale.

Inconvénients :

Malgré les avantages que les générateurs photovoltaïques présentent, des points faibles peuvent se manifester au niveau de fonctionnement et de la fabrication :

- ✓ une fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesels.

- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.
- ✓ La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps.
- ✓ Le niveau de production d'électricité n'est pas stable. Il n'est pas prévisible, il dépend du niveau d'ensoleillement. Cependant la production d'électricité n'est pas constante.

III.4.2 Générateur éolienne

III.4.2.1 Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation

Les éoliennes peuvent être aussi classées selon leur vitesse de rotation. Celle-ci peut être fixe ou variable. Les premières éoliennes implantées sont des éoliennes à vitesse constante utilisant des génératrices asynchrones liées directement au réseau et c'est la fréquence du réseau qui impose la vitesse de rotation de la machine. Cette technologie est moins chère et utilise un système électrique simple ne nécessitant pas un système électronique de commande.

Contrairement à cette technologie et avec le développement de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable utilisent des convertisseurs statiques pour établir une séparation complète entre la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de l'éolienne qui sera adaptée à la vitesse du vent, afin d'optimiser la puissance fournie au réseau ou bien fournie à une charge dans une installation autonome [82].

III.4.2.2 Modélisation de la turbine

Une voilure éolienne (figure III.5) transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique, caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique.



Figure III.5 : Modèle de la voilure

Selon la caractéristique propre de la voilure $C_p(\lambda)$ donnée par l'équation suivante:

$$C_p = \frac{2P_{eol}}{\tau.S.V_V^3} \quad (12)$$

On peut calculer la puissance éolienne qui est donnée par l'équation ci-dessous.

$$P_{eol} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \times \rho \times S \times V_V^3 \quad (13)$$

Le couple éolien est donné par l'équation suivante:

$$C_{eol} = C_{mec} = \frac{1}{2} \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot R \cdot S \cdot V_V^2}{\lambda} \quad (14)$$

III.4.2.3 avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Avantage :

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- ✓ L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols.
- ✓ La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.

- ✓ L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.

Inconvénients :

- ✓ Le vent peut parfois souffler à des intensités irrégulières.
- ✓ Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région.
- ✓ La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie.

III.4.3 Générateur Diesel

Pour assurer la continuité de production d'énergie électrique dans un réseau autonome il est nécessaire de recourir au stockage d'énergie ou d'ajouter un ou plusieurs générateurs diesel. Dans un système hybride PV/Diesel, le générateur classique est généralement constitué d'un moteur diesel qui est couplé à un générateur synchrone (cf. figure 6 ci-dessous). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un régulateur de vitesse. Le régulateur fonctionne en ajustant le flux de carburant de façon à garder la vitesse du moteur diesel et la vitesse du générateur synchrone constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

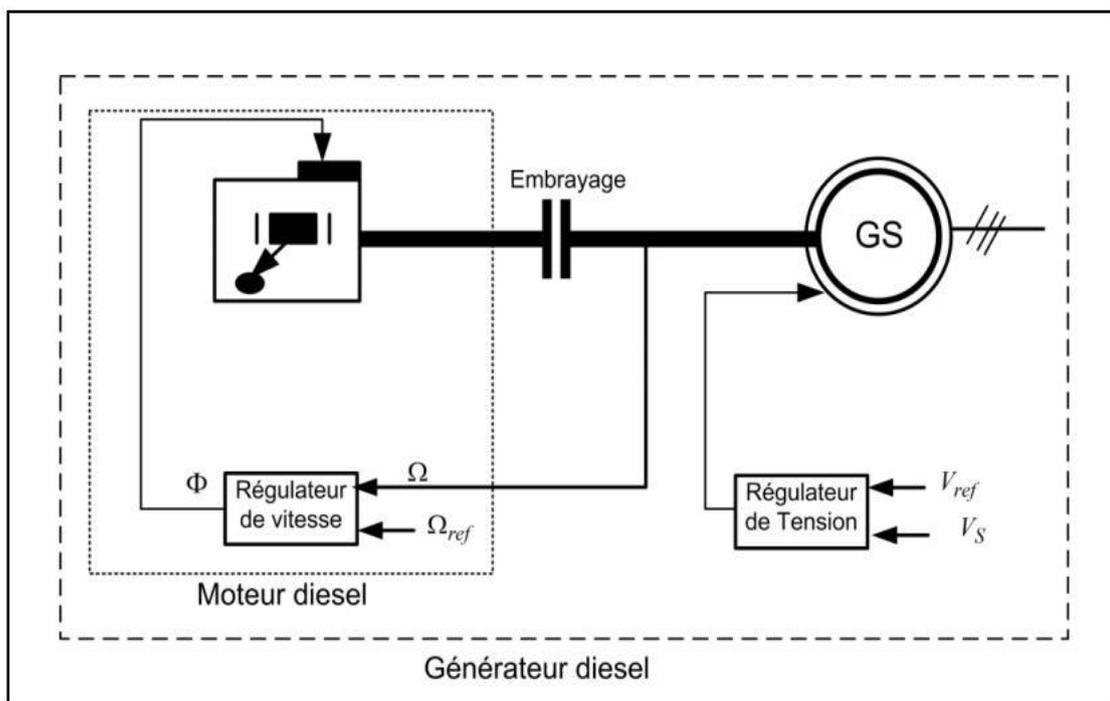


Figure III.6: Configuration du moteur diesel [83]

Le groupe électrogène est constitué d'un moteur Diesel qui fait tourner un alternateur. Le fonctionnement normal du générateur est le suivant : le couple fourni à l'alternateur par le moteur fait tourner le rotor de l'alternateur, ce qui génère des courants triphasés au stator.

Lorsque la puissance du GE change de sens (cas de configuration parallèle), le fonctionnement du GE est modifié. En effet, le courant circule dans le sens inverse : il est absorbé par l'alternateur et contribue à créer un couple qui va faire tourner le rotor et ainsi entraîner le moteur Diesel qui est couplé avec l'alternateur. Ce phénomène est connu sous le nom de *motoring* car la machine synchrone fonctionne alors comme un moteur. Dans le cas de GE reliés au réseau, ce phénomène arrive lorsque l'alimentation du moteur Diesel est coupée ou insuffisante. En effet, lorsqu'il n'y a plus assez de couple pour faire tourner l'alternateur à la vitesse du réseau, celui-ci absorbe de la puissance du réseau et continue à tourner à la même vitesse (imposée par la fréquence du réseau). Dans le cas des systèmes d'énergie hybrides, le retour de puissance peut conduire à l'effondrement du système s'il est conséquent et prolongé. Lorsqu'une charge inférieure à la production de la source renouvelable est imposée, la fréquence du réseau créée par le GE augmente très rapidement et le système s'effondre à cause de la survitesse [84].

Le mécanisme mis en jeu est celui de la régulation de la vitesse du moteur Diesel. Un régulateur agit sur l'admission de combustible dans le moteur afin de maintenir constante. Par son principe même, le régulateur ne modifie la position de la vanne d'admission que si la vitesse de la machine varie. Quand la vitesse augmente, le régulateur diminue l'admission et la puissance décroît ; quand la vitesse diminue, le régulateur augmente l'admission et la puissance croît.

Le courant fourni par le générateur diesel à un instant t est donné par la formule suivante [85]:

$$I_{GD} = I_{GDmax} * x_{GD}(t) \quad (15)$$

Avec I_{GDmax} : Intensité maximale du générateur diesel et $x_{GD}(t)$: le taux de charge (exprimée en pourcentage de sa puissance nominale) à un instant t .

Pour un nombre n_{GD} de générateurs, le courant total à un instant t est donné par :

$$I_{GD}(t) = \sum_{i=1}^{n_{GD}} I_{GDi_{max}} * x_{GDi}(t) * \varepsilon_i(t) \quad (16)$$

Un générateur diesel est caractérisé par sa consommation (horaire ou spécifique) de carburant. La consommation horaire d'un générateur est donnée par la formule suivante :

$$Q(t) = a \cdot P_{GD}(t) + b \cdot P_{GDnom} \quad (17)$$

Ou a (l/kWh) et b (l/kWh) sont des constantes caractéristiques du générateur diesel, $P_{GD}(t)$ est la puissance délivrée à un instant t donnée et P_{GDnom} est la puissance nominale du générateur diesel.

Les puissances P_{GDnom} et $P_{GD}(t)$ s'exprime comme suit :

$$P_{GD}(t) = \sqrt{3} * I_{GD}(t) * U_{GD nom.AC} * \cos \varphi \quad (18)$$

$$P_{GDnom} = \sqrt{3} * I_{GDmax} * U_{GD nom.AC} * \cos \varphi \quad (19)$$

$U_{GD nom.AC}$ et $\cos \varphi$ sont respectivement la tension nominale du générateur diesel et le facteur de puissance.

Pour un nombre n_{GD} des générateurs, on a :

$$P_{GD}(t) = \sum_{i=1}^{n_{GD}} \sqrt{3} * I_{GD}(t) * U_{GD nom.AC} * \cos \varphi * \varepsilon_i(t) \quad (20)$$

$$P_{GDnom} = \sum_{i=1}^{n_{GD}} \sqrt{3} * I_{GDmax} * U_{GD nom.AC} * \cos \varphi * \varepsilon_i(t) \quad (21)$$

Donc à un instant t , la consommation en carburant des générateurs diesel est donnée par :

$$Q_{GD}(t) = \sqrt{3} * \cos \varphi * \sum_{i=1}^{n_{GD}} (I_{GD i_{max}} * U_{GD i_{nom.AC}} * (a * x_{GDi}(t) + b) * \varepsilon_i(t) \quad (22)$$

III.4.4 Modélisation de la batterie

Le modèle de batterie implanté dans les programmes de simulations numériques s'inspire du modèle des batteries Ford (figure III.7). Soit U , la tension aux bornes de la batterie:

$$U = E_0 - K \cdot \frac{\int I_d \cdot dt}{Q_0} - R_b \times I_b \quad (23)$$

E_0 est la tension à vide de la batterie chargée; K une constante qui dépend de la batterie; R_b la résistance interne de la batterie, I_b le courant de décharge (> 0);

Q_0 est la capacité de la batterie (Ah) et $-\frac{\int I_d \cdot dt}{Q_0}$ indique l'état de décharge de la batterie.

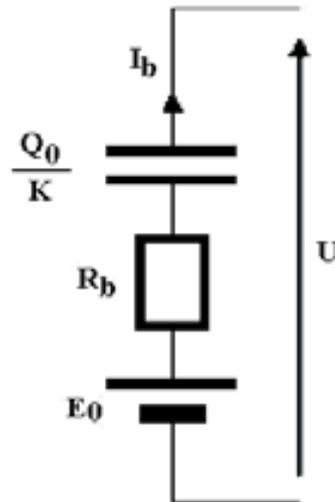


Figure III.7: Modèle électrique de la batterie

III.5 Les systèmes de stockage

Il est possible d'assurer la fourniture de toute l'énergie nécessaire au site directement par les générateurs ; cependant, dans le but de minimiser le fonctionnement du générateur diesel et par suite les émissions des gaz, il est judicieux de rajouter un système de stockage d'énergie. Cela nous permet d'exploiter au maximum les ressources renouvelables disponibles en rechargeant les batteries par ces dernières (solaire et groupe diesel). Enfin dans le cas d'une brusque demande d'électricité, le stockage remplit la fonction de source (tampon), en attendant que le groupe démarre et prenne le relais de la fourniture d'énergie. Il existe plusieurs types de stockage de l'énergie parmi lesquels nous pouvons citer :

- les batteries
- le pompage eau
- le volant d'inertie
- l'hydrogène
- etc.

III.6 Onduleurs

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. Ils sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome (ou encore onduleur réseau)

exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais aussi plus chers.

III.7 Charge

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

III.8 Systèmes hybrides de production d'électricité

Les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables sont les Systèmes d'Energie Hybrides (SEH). Ces systèmes combinent et exploitent plusieurs sources disponibles interconnectées entre elles pour fournir l'alimentation électrique, en général une ou plusieurs sources conventionnelles (groupe électrogène) et au moins une source d'énergie renouvelable. Plusieurs classifications des systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi [86].

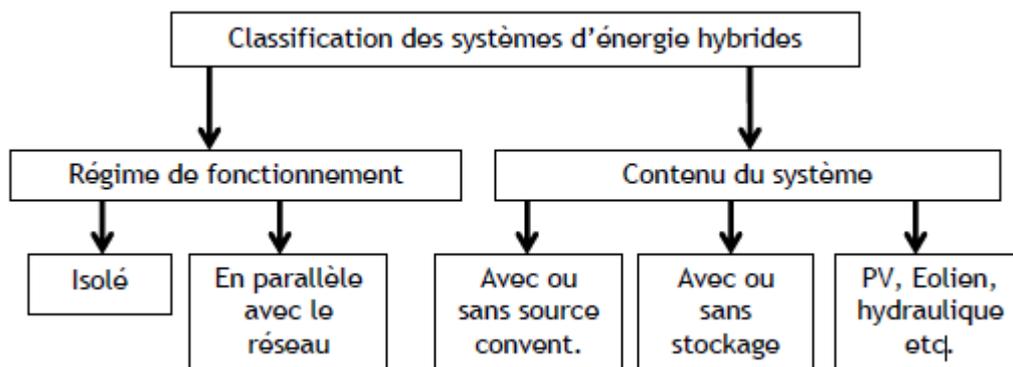


Figure III.8: Classification des systèmes d'énergie hybrides

Le but d'un système d'énergie hybride est d'assurer la fourniture de l'énergie demandée par la charge et de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable [87]. Les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie sont influencés en partie par sa conception

(dimensionnement des composants, types de composants, architecture) et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement.

La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts jusqu'à quelques mégawatts. Ainsi, pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte combinant bus à courant alternatif (CA) et bus à courant continu (CC) avec des batteries de stockage est très répandue [L. Santayana]. Le système de stockage utilise un nombre élevé de batteries de stockage pour être capable de couvrir la charge moyenne pendant plusieurs jours. Ce type de SEH utilise de petites sources d'énergie renouvelable connectées au bus à CC. Quand il existe une production en CA, elle vient des générateurs diesel. Une autre possibilité est de convertir la puissance continue en puissance alternative à l'aide des onduleurs. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (< 5 kW) alimentent généralement des charges à CC. Les systèmes plus grands (puissance > 100 kW) sont centrés sur le bus à CA, avec des sources d'énergie renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés.

Dans les SEH, les éoliennes, les panneaux photovoltaïques et les générateurs diesel sont souvent utilisés. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, géothermique, marémotrice ou l'énergie contenue dans l'hydrogène ; ces systèmes comportent aussi des convertisseurs, des charges et une forme de gestion de l'énergie. Les batteries sont utilisées pour le stockage d'énergie

III.9 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH

Compte tenu de la nature aléatoire et intermittente des sources d'énergie renouvelable, la difficulté principale des SEH comportant ce type de sources est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge. Le moyen le plus simple d'éviter une augmentation du risque de ne pas satisfaire complètement la charge est de faire fonctionner les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesel en parallèle, de façon continue (le générateur diesel fonctionne sans arrêt). Dans ce type de fonctionnement, les sources d'énergie renouvelable agissent comme une charge négative, en réduisant la charge moyenne des générateurs diesel.

Si l'apport en énergie renouvelable est suffisant pour alimenter la plupart de la charge, la quantité de carburant économisé peut alors être augmentée en faisant fonctionner les générateurs diesel par intermittence. En fonctionnement intermittent, les générateurs diesel démarrent et s'arrêtent en fonction de la variation de l'énergie renouvelable et de la charge. Le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesel peut par conséquent être très élevé. Le problème dans ce cas

est l'usure prématurée des GD et de leurs démarreurs. Un autre problème devant être pris en compte quand le générateur diesel fonctionne par intermittence est le temps nécessaire pour la phase de démarrage.

Il arrive parfois que la production d'énergie renouvelable soit plus importante que la consommation de la charge. Si l'excès d'énergie dans le réseau n'est pas éliminé, la production d'énergie renouvelable doit alors être limitée ou même arrêtée. En général, les systèmes sans stockage utilisent une charge de délestage pour maintenir la qualité de la tension. Tous ces dispositifs, tels que les charges de délestage et les systèmes de commande, augmentent le coût d'investissement qui peut ne pas être justifié par les avantages du système hybride.

Un inconvénient majeur dans un SEH connecté en réseau triphasé isolé est le déséquilibre de tension entre les phases. Un récepteur électrique triphasé déséquilibré, ou des récepteurs monophasés déséquilibrés alimentés par un réseau isolés triphasé peuvent conduire à des déséquilibres de tension. Ces déséquilibres provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements supplémentaires dans les machines tournantes à CA.

Du point de vue de la continuité de la production et de la qualité de l'énergie, les facteurs pouvant affecter le fonctionnement d'un SEH sont résumés ci-après :

- Les variations de la charge à long terme : les régions isolées avec des petits réseaux électriques peuvent subir des changements rapides dans leurs besoins en électricité (généralement, la demande augmente).
- Les variations de la charge à court terme : en général, la demande en électricité varie beaucoup sur des intervalles de temps assez courts, de l'ordre de quelques minutes.
- Des valeurs minimales sont suivies par des pics.
- Les ressources en énergie renouvelable : ces ressources (le vent, le soleil) sont stochastiques par leur nature, ont des caractéristiques locales et sont très difficiles à prédire.
- Les perturbations du réseau : les défauts (courts circuits...) peuvent non seulement arrêter les systèmes, mais aussi au pire des cas détruire certains composants.

III.10 simulation du système hybride

Pour simuler le système hybride (éolienne – photovoltaïque - groupe diesel), nous avons réalisé le schéma de simulation de la figure III.9 sous le logiciel Matlab- Simulink. La gestion

d'énergie des différentes sources est assurée par un gestionnaire qui commande l'ouverture et la fermeture des commutateurs selon les conditions météorologiques (Figure III.10).

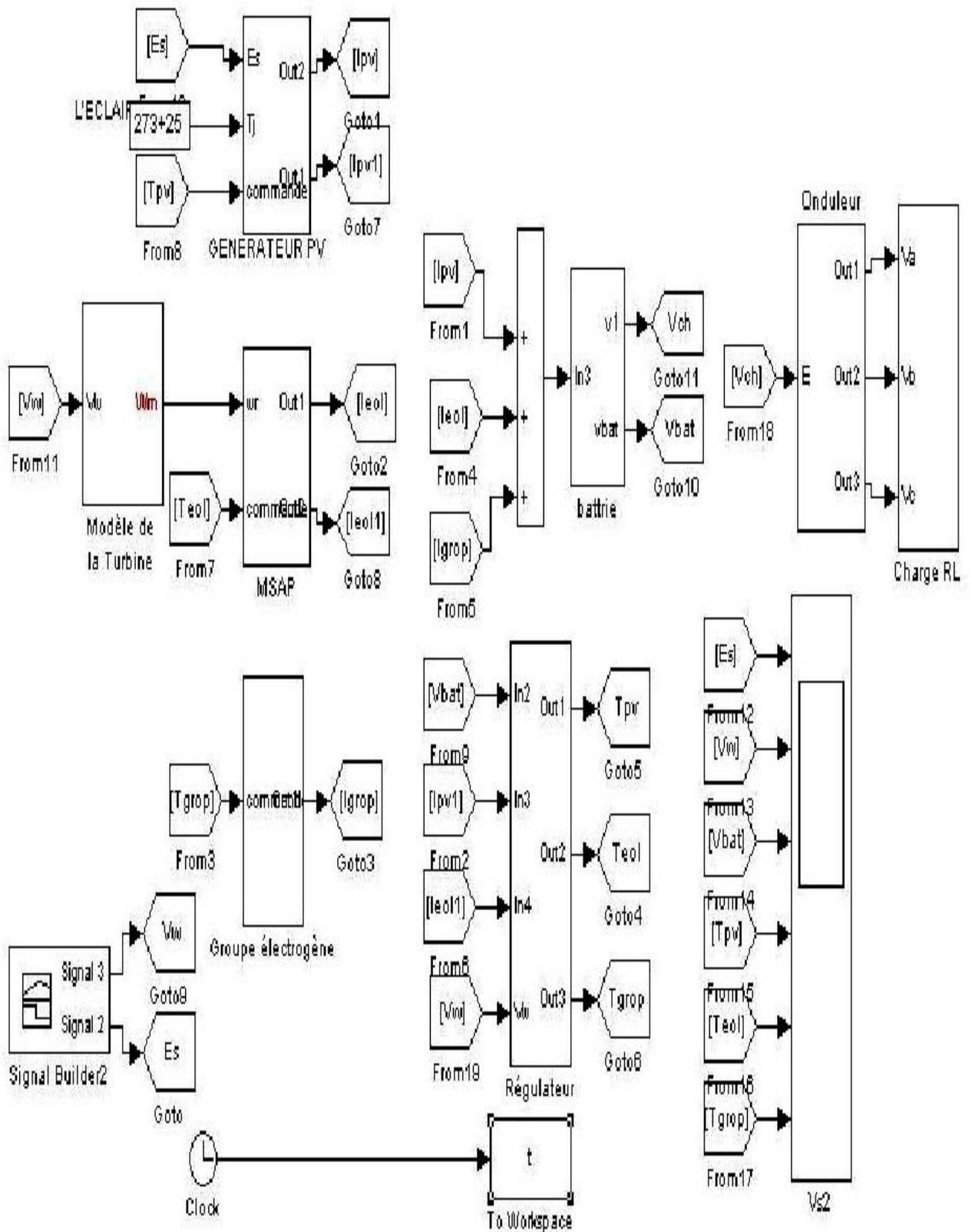


Figure III.9 : Schéma de simulation du système hybride

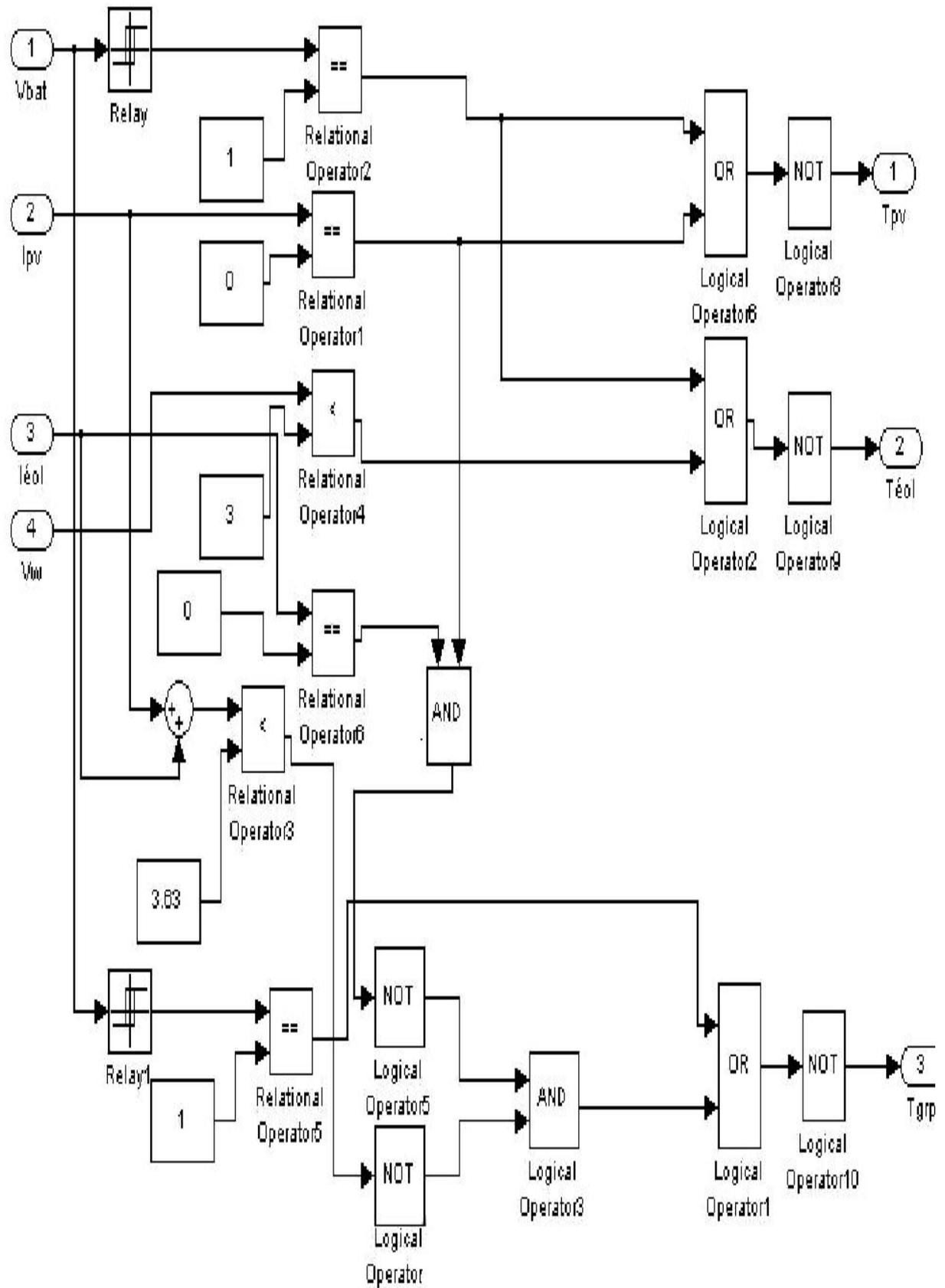


Figure III.10 : Schéma de simulation du gestionnaire

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, le dimensionnement d'une centrale hybride autonome (photovoltaïque, éolienne, diesel) a été effectué, par l'estimation du potentiel énergétique journalier disponible et la puissance demandée par l'utilisateur.

A partir de ces données indispensables, on a dimensionné le champ photovoltaïque, la turbine éolienne avec son générateur et un groupe diesel qui convient à notre installation.

Notre choix s'est porté sur un dispositif de stockage d'énergie par batteries. La simulation numérique de chaque générateur et de toute la chaîne hybride montre l'efficacité et la fiabilité de ce dispositif.

CHAPITRE

IV

Chapitre IV

Application et interprétations des résultats

IV.1 Introduction

Le vent ou le soleil sont des ressources énergétiques inépuisables mais fluctuantes. D'où pour toute installation multi-sources, une étude des caractéristiques énergétiques s'impose. En voici les étapes essentielles :

- Collecter les données météorologiques et la consommation énergétique de l'habitat concerné,
- Quantifier les ressources énergétique (éolien, photovoltaïque, ...)
- Evaluer les besoins énergétiques de l'habitat résidentiel en question.

Cette analyse est de nature à mettre en évidence les variantes paramètres indispensables par la suite à la simulation d'un système hybride.

Les systèmes hybrides utilisent différentes sources d'énergies comme l'éolien, le photovoltaïque et le générateur diesel. Ce type de système peut représenter une solution pour les régions éloignées d'un grand réseau interconnecté [88]. Cependant le dimensionnement et l'architecture de système de génération d'énergie est une étape primordial dans la conception et la réalisation de même système, ce qui n'est pas bien traduites dans la littérature. Plusieurs études prennent le paramètre variable de la plupart des énergies renouvelables pour la réalisation d'un système de contrôle complexe. Dans la même tache un contrôle de la tension et de la fréquence pour un système éolien-diesel est montré dans l'article. La modélisation étant aussi un facteur majeur pour des études élaborées afin de simuler un bon fonctionnement de système.

Pour but d'améliorer la qualité de l'énergie produite par un système de production d'énergie électrique, un système hybride est proposée dans ce chapitre. Une application d'un système hybride est simulé sur le logiciel HOMER afin d'alimenter un site situé à une région de la ville de Ghardaïa, pour une optimisation qui permet de déterminer le type du système hybride réel a installé. Des résultats de simulations sous Matlab/Simulink seront présentés pour confirmer le bon fonctionnement de système afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

IV.2 Architecture des systèmes hybrides

Les différents générateurs d'énergies qui construisent le système hybride peuvent se connecter en plusieurs configurations ce qui rend la topologie du système plus variée selon notre besoin. Deux types d'architectures peuvent exister le plus souvent, une à un bus CC et une autre à un bus mixte CA/CC.

IV.2.1 Architecture à bus CC

Dans cette topologie du système, la puissance fournie par chaque générateur est centralisée sur un bus CC, la connexion de toutes les sources sur un seul bus simplifie le système de commande et mène à bien maîtriser leur fonctionnement au niveau de dimensionnement optimale de générateur diesel, ce dernier est connecté à un onduleur pour alimenter les charges à CA. En outre tous les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs, ce phénomène peut faiblir le rendement de système (figure IV.1).

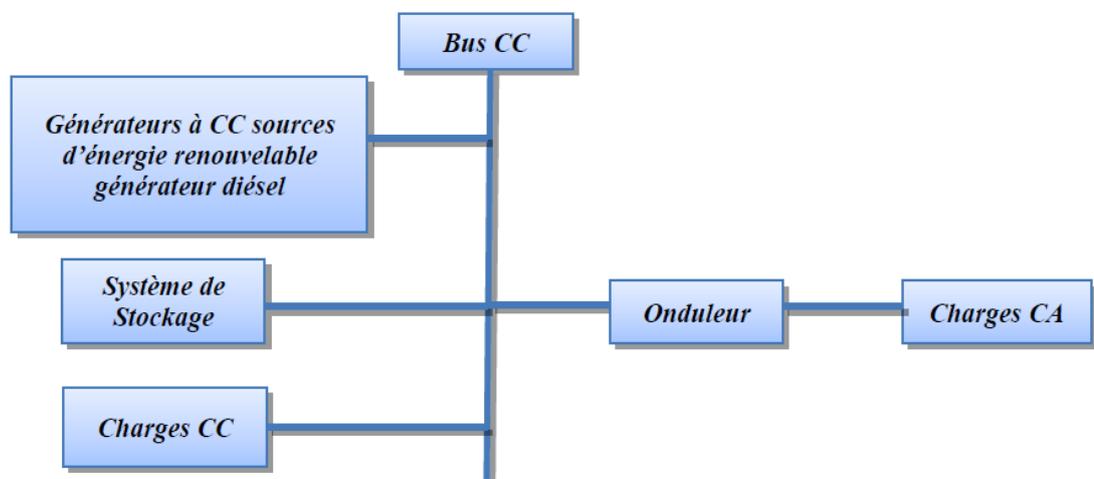


Figure IV.1 : Configuration d'un SH à bus CC [89]

IV.2.2 Architecture à bus CC /CA

Dans cette configuration, les générateurs d'énergie renouvelable et le générateur diesel peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement sans passer par un convertisseur de puissance, ce qui augmente le rendement du système et minimise les pertes en puissance.

Le générateur diesel et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou bien en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie et donnant un avantage particulier pour un fonctionnement des deux sources pendant les pics des charges. La présence d'un convertisseur bidirectionnel peut remplacer le redresseur et l'onduleur situés entre les deux bus. Mais ce mixage de bus complique le système à cause de fonctionnement parallèle des composants (figure IV.2).

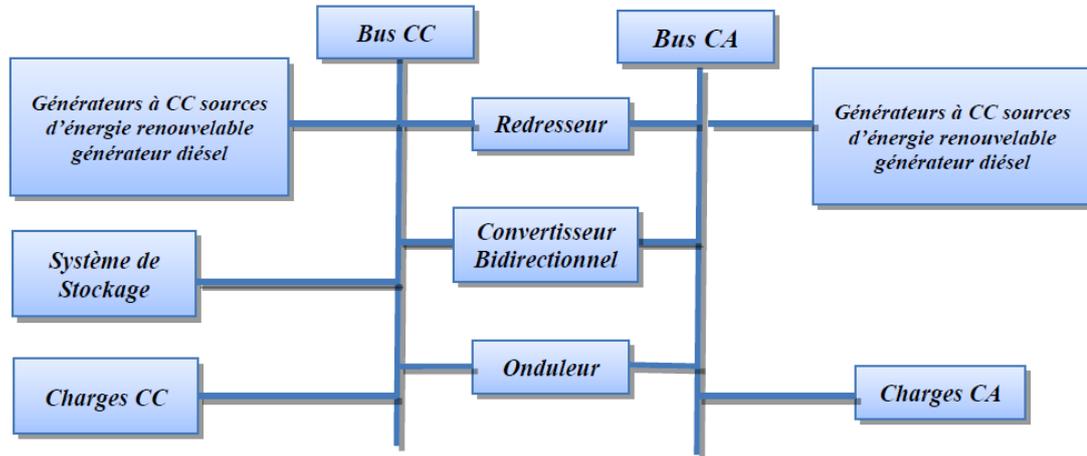


Figure IV.2 : Configuration du SH à deux bus à CC et à CA [89]

IV.3 Application : Une habitation à Ghardaïa

IV.3.1 L'emplacement choisit

L'objectif de cette étude est de choisir un site dans une région dans l'Algérie pour étudier la faisabilité de l'utilisation d'un système hybride de génération d'énergie pour alimenter des maisons tout au long de l'année. La ville choisit pour l'étude était Ghardaïa située au centre de la partie Nord du Sahara algérien (32.29°N, 3.40°E, 450m), elle est délimitée :

- au nord par la wilaya de Laghouat ;
- au nord-est par la wilaya de Djelfa ;
- à l'est par la wilaya d'Ouargla ;
- au sud par la wilaya de Tamanrasset ;
- au sud-ouest par la wilaya d'Adrar ;
- à l'ouest par la wilaya d'El Bayadh.

Afin de construire ce système d'énergie, on doit disposer tous les informations pour l'emplacement sélectionné. Les informations typiques sont : le profil de charge qui devrait être pris

en charge par le système, le rayonnement solaire pour les panneaux solaires, la vitesse du vent pour la production d'énergie éolienne, le coût initial de chaque composant (diesel, générateurs d'énergies renouvelables, batteries, convertisseurs), le coût du carburant et la durée de vie du projet. Ensuite, on utilisant ces données, on peut effectuer la simulation pour obtenir la meilleure configuration du système d'alimentation hybride pour cet endroit précis.

IV.3.2 Evaluation de la consommation

L'étude des systèmes hybrides éoliens photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel nécessite la connaissance de la consommation en électricité de ce dernier. Pour cette raison, nous avons modélisé un profil de consommation pour un foyer type de 120m² (f3) 2 chambres et un salon avec 4 personnes.

Tableau IV.1 : profile de charge d'un habitat sélectionné

Equipement	Puissance max (W)	Nombre	Temps de fonctionnement (h)	La consommation (Kw/jour)
Eclairage				
Lampe (30w)	30	7	4h	0.84
Lampe (60w)	60	2	2h	0.24
réfrigérateur	55	1	24h	1.32
La lave vaisselle	2200	1	2	4.4
La machine à laver	2000	1	2	4
Climatiseur	1000	1	10	10
Télévision+Démodulateur	110+40	3	10	4.5
PC	90	2	4	0.72
Totale	26.02			

Le tableau IV.1 montre le profil de charge d'une maison sélectionnée. Le processus de simulation du système hybride choisi a été analysé pour voir si l'utilisation du système d'alimentation sera possible ou non. L'objectif supplémentaire était de voir l'effet de l'utilisation du système hybride pour leur fournir de l'énergie électrique.

La charge journalière est de 88 KWh par jour, la charge journalière pour le consommateur algérien est de 5 KWh à 10 KWh par jour.

IV.3.2 Estimation des ressources énergétiques solaire et éolienne, diesel

L'étape essentielle dans la conception d'un système couplé est la détermination de sa taille optimale qui dépend essentiellement des données climatiques du site. Généralement, on utilise les moyennes mensuelles des données climatiques et/ou une estimation du nombre de jours consécutifs de faible ressource climatique (vent, irradiation solaire) pour déterminer la surface de l'aérogénérateur, la taille des panneaux photovoltaïques et la capacité des batteries [90], [91]. L'analyse des ressources locales (vitesse du vent et éclairage), requiert une campagne de mesure et une analyse préalable des spécificités du site. Pour créer une base de référence pour notre étude nous avons choisi d'adopter des données pertinentes des mesures techniques faites pendant une année

IV.3.2.1 Potentiel éolien

Pour évaluer le potentiel éolien du site, des mesures de vitesse du vent ont été prises sur site durant l'année 2009, avec un intervalle de 1 heure (24 mesures par jours).

Etant donné que le potentiel de puissance éolienne est à peu près proportionnel au cube de la vitesse du vent. Il faudrait donc raffiner l'information sur la vitesse du vent en fonction du degré de précision requis.

Les vents sont plus fréquents dans la région de Ghardaïa. Les valeurs des vitesses des vents enregistrés dans cette région de sont représentés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 : vitesses moyennes mensuelles du vent (m/s) enregistrées durant l'année 2009

mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
V_V (m/s)	16.9	11.4	13.7	15.5	15.5	12.7	9.7	10.4	9.6	7.4	8.3	11.1

(O.N.M Ghardaïa, 2009)

V_V (m/s) : vitesses moyennes mensuelles du vent (m/s).

La vitesse moyenne du vent au cours de l'année 2009 à Ghardaïa fluctue entre 16,7 m/s en mois de janvier et 8,3 m/s en mois de novembre.

Quand on veut utiliser l'énergie éolienne, il faut savoir quelles sont les places appropriées. Pour obtenir une bonne performance d'une turbine éolienne, il faut une vitesse de vent minimum dans la plage de 5.5 à 7.0 m/s.

IV.3.2.2 potentiel solaire

De même que les vitesses, des mesures de l'irradiation solaire ont prises sur le site. En utilisant l'orientation et l'inclinaison des modules PV, la latitude du lieu et les valeurs du rayonnement global.

➤ Data base de mesures

Depuis août 2004 à Ghardaïa, la station de mesure est fonctionnelle [92], l'enregistrement des composantes du rayonnement solaire se fait quotidiennement durant 24 heures avec un pas de cinq minutes pour chaque paramètre (diffus, direct et global). Ensuite, un traitement de données est nécessaire pour les rendre exploitables (figure IV.3).

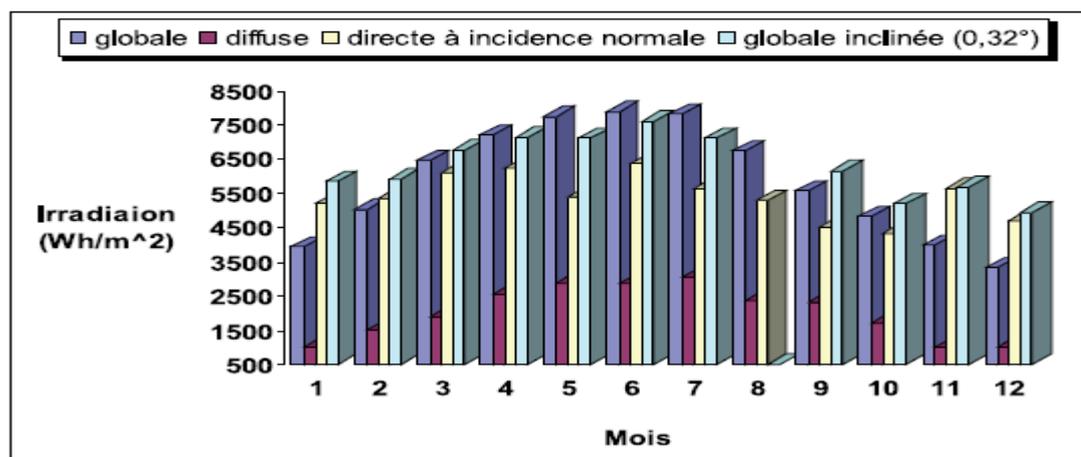


Figure IV.3 : irradiation globale, diffuse, directe normale et globale inclinée collecté par la station radiométrique

➤ Valeurs mensuelles et annuelles du rayonnement global

D’après le tableau IV.3, on constate que la valeur annuelle du rayonnement global varie entre 2000 et 2126 kWh/m², tandis que la moyenne annuelle est de l’ordre de 2061 kWh/m². Considérant les valeurs mensuelles, le maximum absolu est de l’ordre de 251 kWh/m² et le minimum absolu est de 86 kWh/m².

Tableau IV.3 : Valeurs mensuelles et annuelles du rayonnement global (kWh/m²) sur un plan horizontal au site de Ghardaïa (2014)

Année	mois												total
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2005	120	140	181	220	240	234	233	163	181	150	121	107	2090
2006	102	132	205	214	216	240	242	111	178	165	127	95	2027
2007	86	127	194	203	243	244	252	215	178	153	130	101	2126
2008	126	136	187	212	236	251	151	205	134	135	123	104	2000
moyenne	109	134	192	212	234	242	220	174	168	151	125	102	2061

➤ **Distribution du rayonnement global horaire**

Le tableau IV.4 montre la distribution typique du rayonnement global sur un plan horizontal par tranche horaire au cours de l'année au site de Ghardaïa en 2014 [93].

Tableau IV.4 : distribution du rayonnement global horaire (Wh/m²) reçu sur un plan horizontal.

Mois	Temps (heurs)													
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Janvier	0	0	30	209	404	563	656	682	642	535	373	157	20	0
Février	0	0	77	288	499	657	758	785	763	653	492	290	74	0
Mars	0	15	162	394	602	759	858	879	827	688	502	336	125	0
Avril	0	110	346	573	776	906	979	1001	952	841	673	438	160	16
Mai	21	180	408	629	807	931	1008	1019	1000	891	718	508	280	76
Juin	47	199	413	636	828	958	1019	1032	982	870	703	491	284	82
Juillet	14	110	349	569	747	885	951	953	939	843	676	476	265	79
Aout	0	105	321	544	730	869	946	976	926	838	671	467	240	52
Septembre	0	58	245	466	653	789	847	851	804	705	511	279	93	0
Octobre	0	31	215	440	628	771	852	847	777	645	470	242	35	0
Novembre	0	0	131	337	522	649	721	721	657	527	330	131	0	0
Décembre	0	0	53	240	418	548	623	622	570	451	285	91	0	0

➤ **Variation de l'éclairement globale et de la température ambiante**

La figure IV.4 montre l'allure de l'éclairement globale la température ambiante pendant la journée du (16/05/2014) au site de Ghardaïa, les données seront importantes et utilisables pour notre étude.

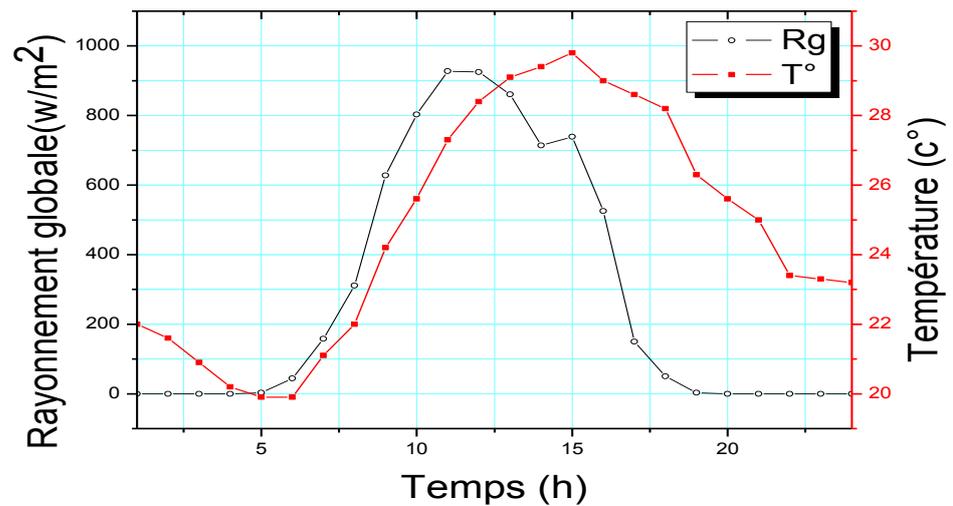


Figure IV.4 : Evolutions temporelles de la température ambiante, et du rayonnement solaire globale

On remarque que la température ambiante augmente et diminue avec le rayonnement solaire global pendant la journée.

La région de Ghardaïa figure parmi les régions candidate à l'implantation de système hybride (PV/éolienne/diesel)

IV.4 Construction de système hybride de génération d'énergie

Sur l'environnement HOMER, nous avons défini chaque élément de notre installation en se basant sur toutes les caractéristiques et les données fournies dans le paragraphe précédent.

Le schéma d'un système hybride de génération d'énergie qu'on va simuler par HOMER est présenté par la figure IV.5.

Le cas d'étude :

Charge : valeur moyenne : 88 Kwh/j.

Eclairement : valeur moyenne : 5,61 Kwh/m²/j.

Vitesse du vent, valeur moyenne : 5,14 m/s.

Le prix de carburant : 14 DA/L.

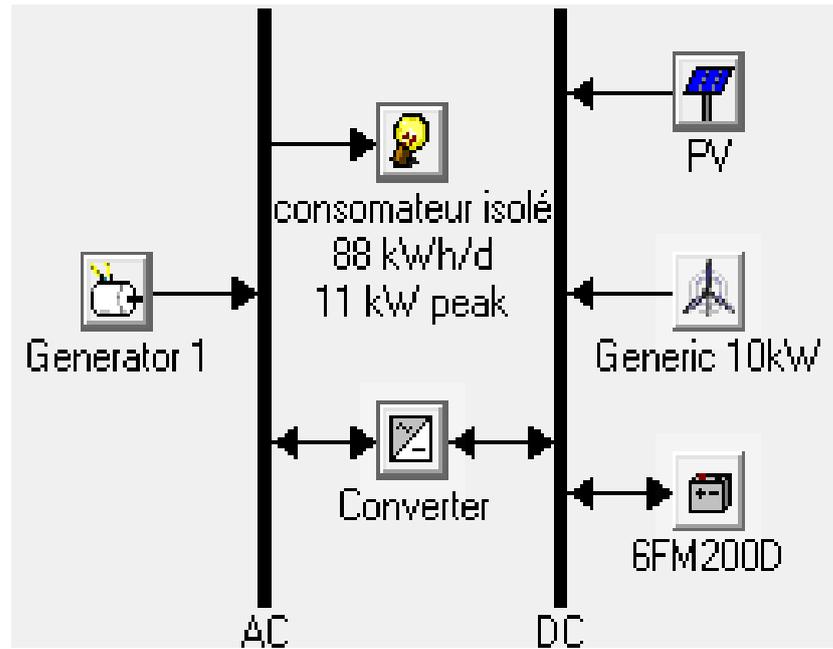


Figure IV.5 : Architecture d'un système hybride

Le modèle de système hybride présenté par HOMER peut être simulé par l'introduction de nombreux facteurs telle que le coût des composants, la disponibilité des ressources. Un autre facteur majeur au niveau de cette implantation numérique est l'évaluation de long de vie du projet qui est estimé pour 25ans. Les calculs présentés par le logiciel prennent en compte des valeurs tels que le capital de l'intérêt, l'amortissement, le frais de fonctionnement, le coût du carburant... Toutes ses estimations rentrent dans le bon fonctionnement du système étudié.

La simulation du système hybride par HOMER provient la combinaison optimale des éléments construisons le système. Elle est présentée selon une valeur actuelle nette (NPC) et selon différentes contraintes qui ont participés à la définition de système. Notre cas traite une simulation d'un système hybride de génération d'énergie électrique qui contient deux systèmes à énergie renouvelable photovoltaïque et éolien, et un autre système diesel, avec la présence des batteries et des convertisseurs, le système est autonome du réseau.

Dans ce cas HOMER présente le résultat de simulation comme illustré dans la figure IV.6.

	PV (kW)	G10 (kW)	Label (kW)	6FM200D (kW)	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
	10	5	10	3	10	\$ 35,380	2,025	\$ 61,266	0.149	0.76	7,466	4,364

Figure IV.6 : Résultat de simulation de système hybride par HOMER

En effet HOMER simule toutes les configurations faisables des systèmes hybrides capables de fonctionner parfaitement dans le site choisi avec la fourniture de l'énergie électrique suffisante au profil de charge et présente la configuration optimale comme suit :

PV : 10 Kw.

Eolien (G10): 5 générateurs de 10 Kw.

Générateur diesel (label) : 10 kw.

Batteries (6FM200D) : 3 l a m e s de batteries.

Convertisseur : 1 seul convertisseur de 10 Kw.

Chaque générateur produit de l'énergie individuellement. L'énergie produite du système optimal est montrée dans la figure IV.7 ci-dessous.

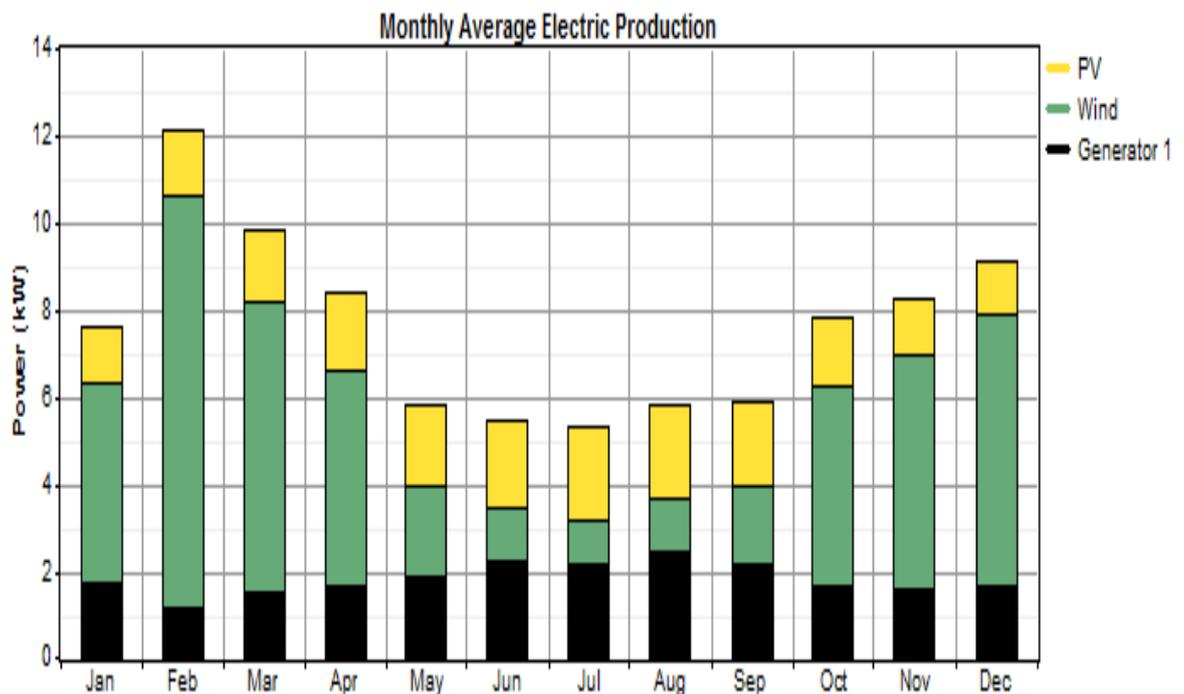


Figure IV.7 : Puissance moyenne produite par chaque source

Dans les tableaux suivants, on présente des résultats approfondis pour le même système.

Le tableau IV.5 présente le taux de production d'énergie électrique pour chaque générateur tout au long de l'année.

Tableau IV.5 : Energie annuelle produite par chaque générateur

Production	Kwh/année	%
PV	14,917	22
Eolien	32.740	54
Générateur Diesel	15.900	24
Total	66.557	100

De la figure IV.7 et le tableau IV.5, on constate que la production de l'énergie par le système hybride optimal durant une année complète de fonctionnement présente une continuité de production d'énergie. On remarque que plus de 70% de l'énergie est produite par les générateurs à énergies renouvelables (54% pour l'éolien et 22% pour les panneaux photovoltaïques), une chose qui participe à la diminution de l'effet de serre pour notre planète. Une autre remarque constatée est la variation de la production d'énergie pour chaque générateur durant l'année, il apparaît que le générateur éolien participe avec une grande puissance produite dans la saison d'automne et hiver ; cette puissance se diminue avec la diminution de vitesse du vent dans le printemps et l'été. Cependant la production de générateur photovoltaïque augmente par la présence d'éclairement important. La production du générateur diesel s'augmente dans le même effet pour satisfaire la demande d'énergie de la charge. L'étude de production d'énergie pour chaque générateur est illustrée comme suit.

IV.4.1 Le générateur photovoltaïque

Les paramètres de fonctionnement de panneau photovoltaïque sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau IV.6 : Information concernant la production d'énergie par le GP

Variable	valeur
Heure de fonctionnement	4381 h/année
Puissance moyenne produite	1.7 KW

Puissance maximale produite	10.4 KW
Pénétration de PV	46.9 %
Total de production d'énergie	14.917 KWh/an

La figure IV.8 présente une présentation **DMAP** de production d'énergie par le GP, ce type de graphe met en évidence un an de données horaires, chaque heure de l'année est présentée par une couleur qui simule une information précise d'une valeur de donnés. Cette présentation permet de voir plus clairement les informations utiles pour une interprétation facile et concrète.

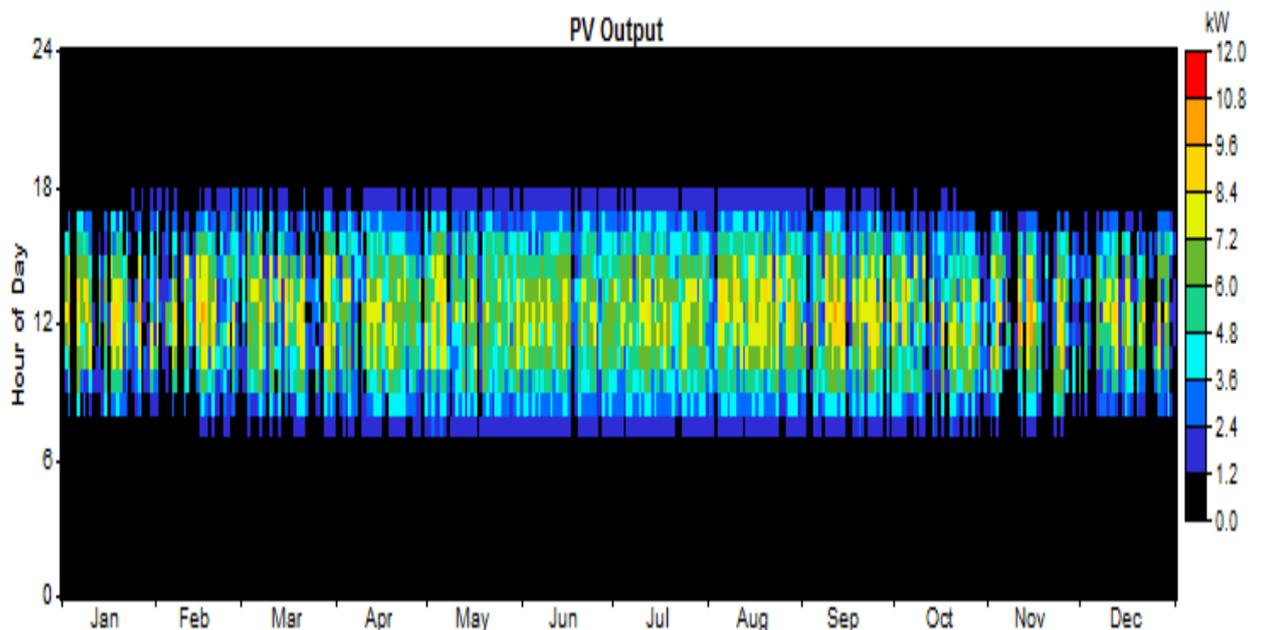


Figure IV.8 : DMAP de production horaire par le GP

On peut remarquer que la période de fonctionnement de GP est bornée dans les mois d'hiver entre 7h du matin au 17h, et inversement dans la saison d'été cette limite se stabilise entre 6 du matin jusqu'au 18h. La production des GP est nulle dans l'heure pointe selon le profil de charge journalière à 20h, ce qui introduit en parallèle le fonctionnement d'autres générateurs ou bien le recours d'énergie stockée dans les batteries pour répondre au demande de charge.

IV.4.2 Le générateur éolien

Les paramètres de fonctionnement de générateur éolien sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau IV.7 : Information concernant la production de l'énergie éolienne

Variable	valeur
Heure de fonctionnement	6107 h/année
Puissance moyenne produite	4.1 Kw
Puissance maximale produite	9.41 Kw
Pénétration de l'éolien	111%
Total de production d'énergie	35.740 Kwh/an

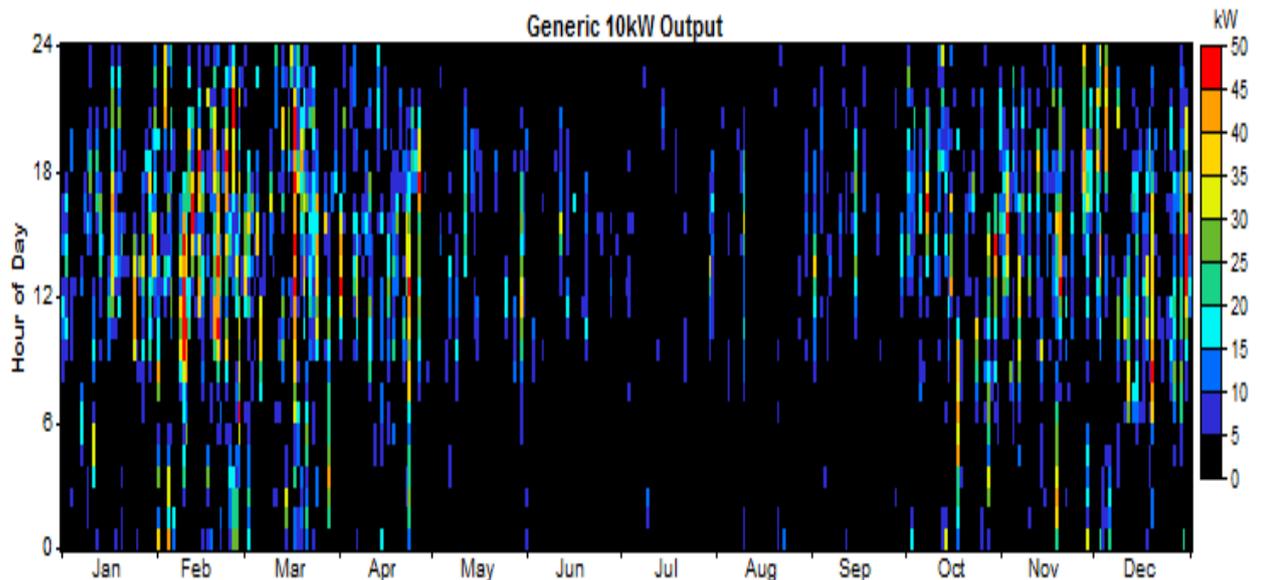


Figure IV.9 : DMAP de production horaire par l'éolien

Comme illustré dans la figure IV.9, le générateur éolien fonctionne toute la journée, ce qui est bien montré dans le graphe **DMAP**. La production de l'énergie éolienne se bénéficie des grandes valeurs tout le long des mois d'automne et d'hiver, ce qui est bien traduit avec des couleurs bien claires, contrairement aux mois du printemps et d'été où la vitesse de vent se diminue, la production éolienne se diminue en parallèle.

IV.4.2 Le générateur diesel

Les paramètres de fonctionnement de GD sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau IV.8 : Information concernant la production de l'énergie par le GD

variable	valeur
Heure de fonctionnement	4364 h/année
Puissance moyenne produite	3.64 KW
Puissance maximale produite	10 KW
Carburant utilisé annuellement	7464 L/an
Utilisation spécifique du carburant	0.470 L/Kwh
Total de production d'énergie	15.900 Kwh/an

Dans la suite et a l'objectif de voir la différence dans la consommation de carburant par le GD, on va faire une comparaison entre trois représentations **DMAP** de production d'énergie d'un GD installé dans trois systèmes hybrides différents :

- 1- Un SH éolien-PV-diesel.
- 2- Un SH éolien-diesel.
- 3- Un SH PV-diesel.

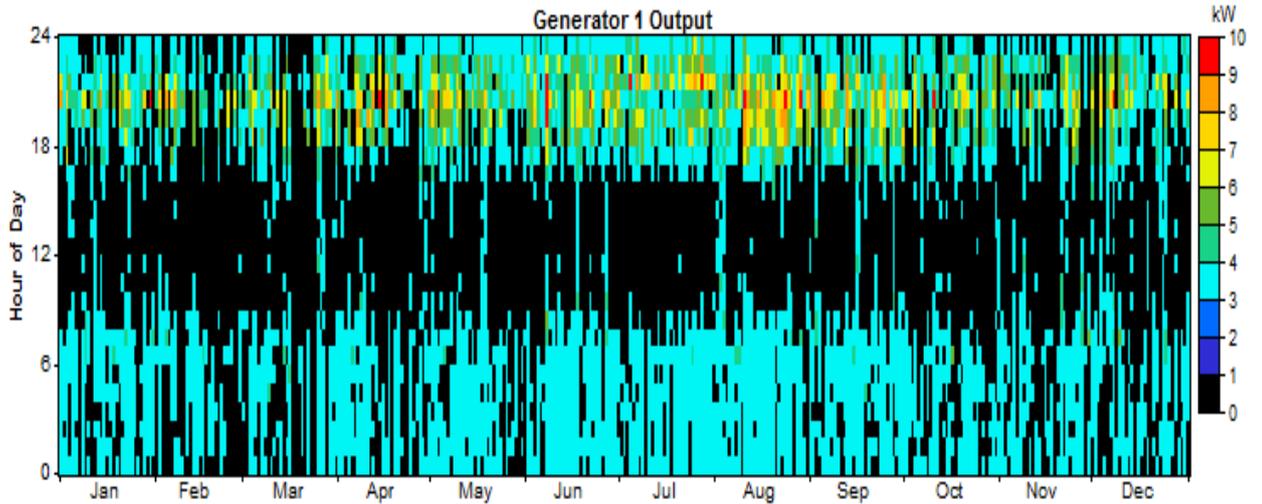


Figure IV.10 : Dmap de production horaire par le GD pour un système éolien-PV-diesel

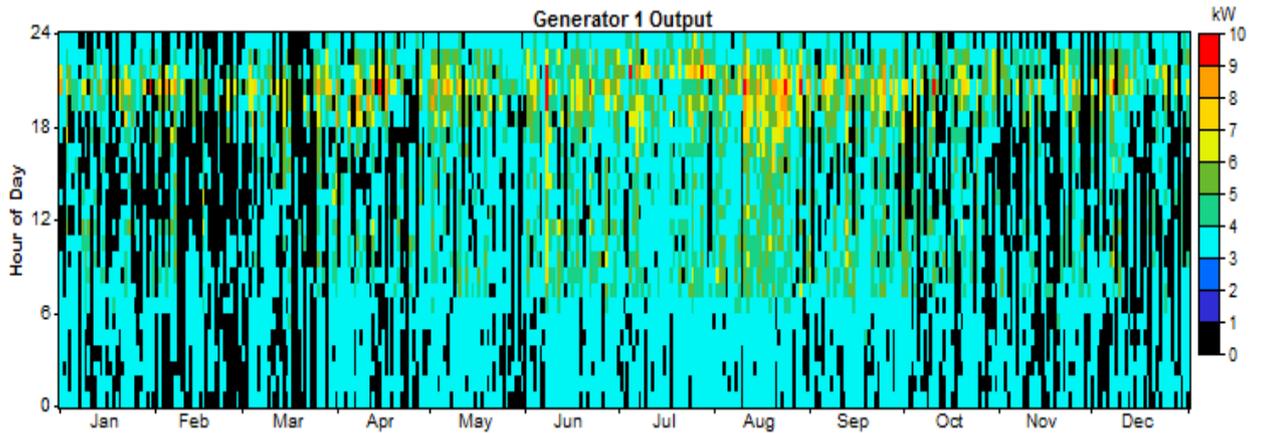


Figure IV.11 : Dmap de production horaire par le GD pour un système éolien-diesel

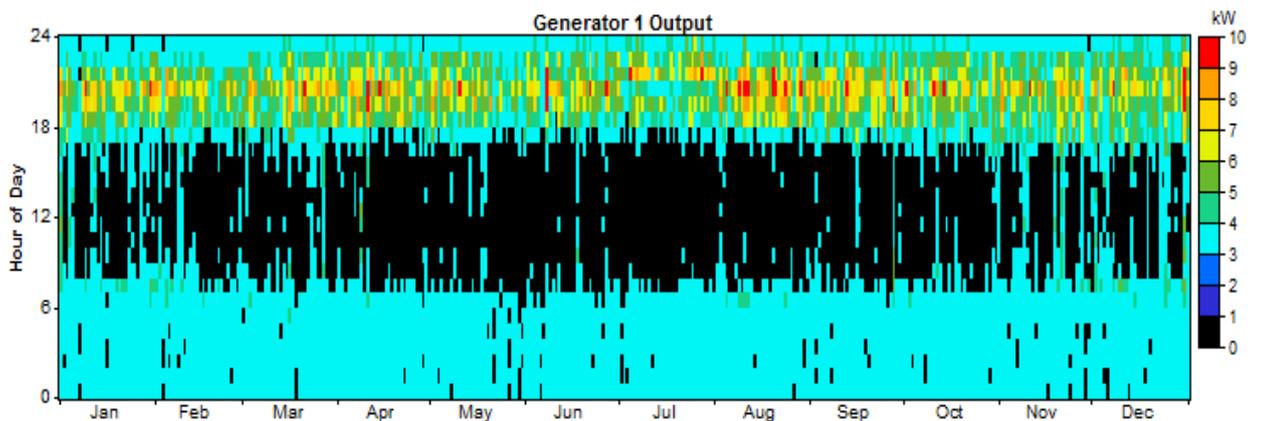


Figure IV.12 : Dmap de production horaire par le GD pour un système PV-diesel

Comme illustré dans les figures ci-dessus (figure IV.10, figure IV.11, figure IV.12), la génération d'énergie par le GD diffère d'un système hybride à un autre. L'objectif de la

comparaison est la mise en place pour voir la nécessité de l'utilisation des systèmes de générations d'énergies basés sur les énergies renouvelables en parallèle avec le fonctionnement du GD pour but de minimiser l'utilisation de combustible fossile.

On remarque que plus qu'on ajoute des générateurs renouvelables plus qu'on diminue l'utilisation de combustible pour la génération d'énergie électrique.

Une autre conclusion qu'on la prend de la simulation globale d'un système hybride par HOMER est que le critère financier joue un rôle important dans le mécanisme de construction de système. Avec le coût élevé des panneaux solaires et leur production minimale en comparaison avec le générateur éolien dans le site de Ghardaïa, on va baser sur l'étude d'un système hybride éolien-diesel qui peut satisfaire la demande de charge d'une manière faisable et participe à la diminution de coût d'installation.

Dans ce qui, on s'intéresse à étudier le bon fonctionnement d'un système hybride éolien – diesel pour la génération d'énergie par le logiciel Matlab/Simulink.

IV.5 Système hybride éolien-diesel

IV.5.1 Principe de fonctionnement d'un système hybride éolien diesel

La Figure IV.13 montre la structure générale d'un système hybride éolien diesel (SHÉD). Le vent construit l'élément dominateur. Si la vitesse du vent est suffisante, l'éolien alimentera seule la charge primaire. Le surplus de puissance est envoyé vers la charge secondaire. Cependant la régulation de la fréquence est assurée par cette même charge secondaire dans le cas de ce mode de fonctionnement. Durant ce fonctionnement, le moteur diesel se déconnecte automatiquement de la génératrice synchrone par un embrayage. Le générateur synchrone fonctionne ainsi comme un condensateur synchrone en fournissant de la puissance réactive dans l'objectif de maintenir la tension d'alimentation constante. Dans le cas où la vitesse du vent est moins forte, l'éolienne produisant peu de puissance, cette dernière est incapable d'alimenter totalement la charge, alors le générateur diesel interviendra en fournissant la puissance requise. Si la vitesse du vent est très faible, le GD alimente seul toute la charge. Dans ce cas, le GD assure seul la régulation de la tension et la fréquence.

IV.5.2 Configuration et simulation du modèle

Le système quand va étudier est illustré dans la Figure IV.13.

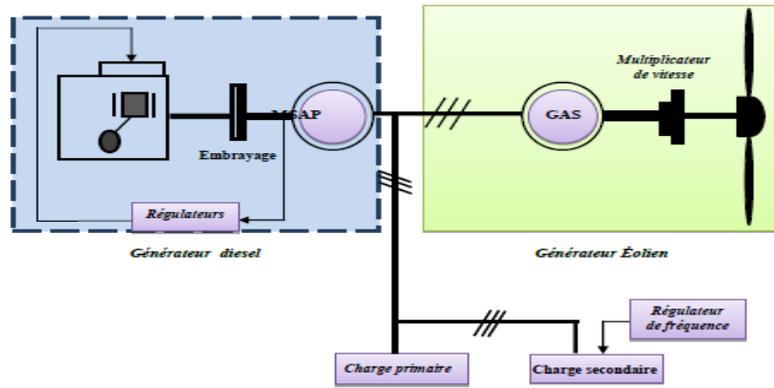


Figure IV.13 : Système hybride éolien diesel

Dans notre configuration le système fourni de l'énergie électrique à l'aide d'un système éolien constitué par une turbine reliée avec une génératrice asynchrone d'une puissance apparente de 250kVA et un autre système diesel qui est constitué par un moteur diesel relié à une génératrice synchrone à aimant permanent d'une puissance apparente de 300kVA, qui fournit du réactif nécessaire pour amorcer la génératrice asynchrone. Ce système hybride de génération d'énergie, alimente une charge principale de 250kW et une charge secondaire variable entre le 0 et 400kW associé à un régulateur de fréquence. Le système fonctionne sur une tension de 380V et une fréquence de 50Hz.

Le temps de simulation est de 10s avec une période d'échantillonnage de 1ms. La charge primaire étant 100kW jusqu'à $t=3s$, à cet instant on ajoute une autre charge pour atteindre une totalité de 250kW (Figure IV.14).

Le vent est simulé par sa valeur réelle.

Les résultats de simulation sont montrés sur les figures ci-dessous.

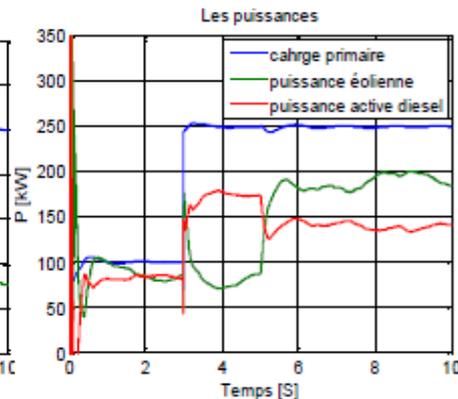
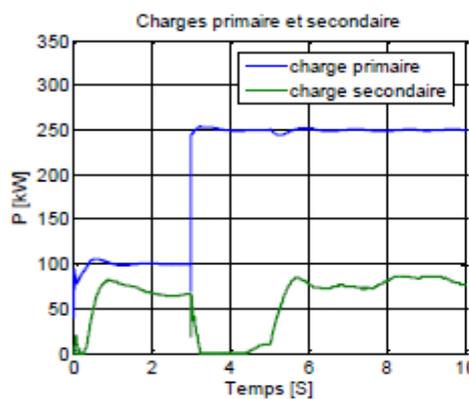


Figure IV.14 : Puissance de la charge Figure IV.15 : Puissance de charge et de SHED

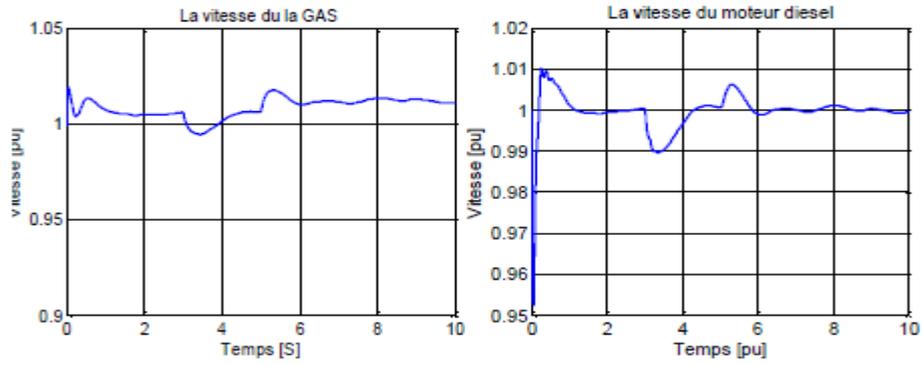


Figure IV.16 : Vitesse de la GAS Figure IV.17 : Vitesse du moteur diesel

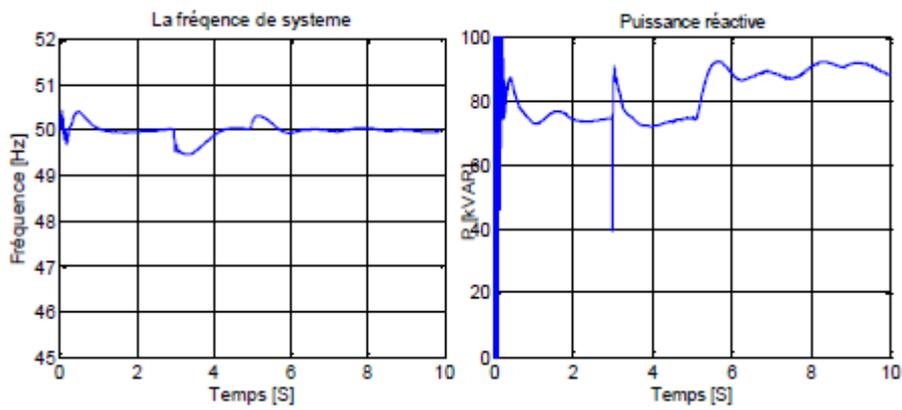


Figure IV.18 : Fréquence du système hybride Figure IV.19 : Puissance réactive générée GD

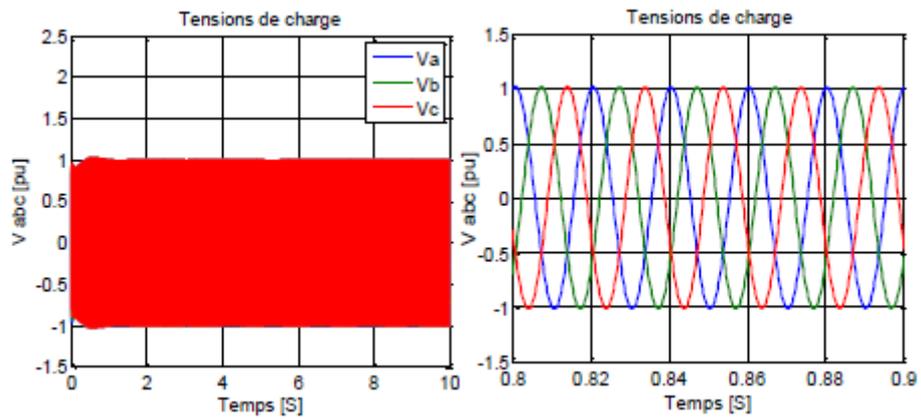


Figure IV.20 : Les tensions de la charge Figure IV.21 : Zoom des tensions de la charge

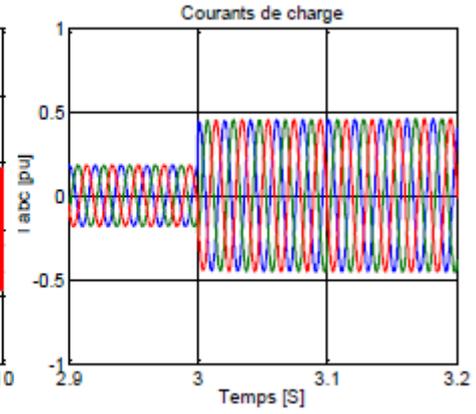
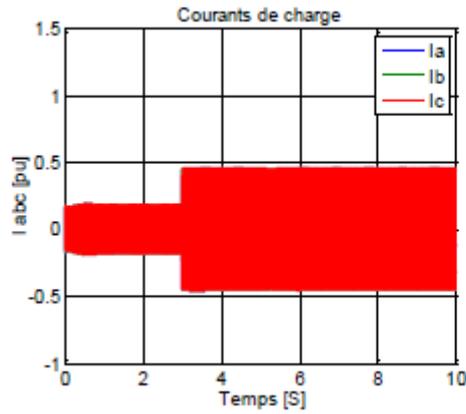


Figure IV.22 : Les courants de charge Figure IV.23 : Zoom des courants de charge

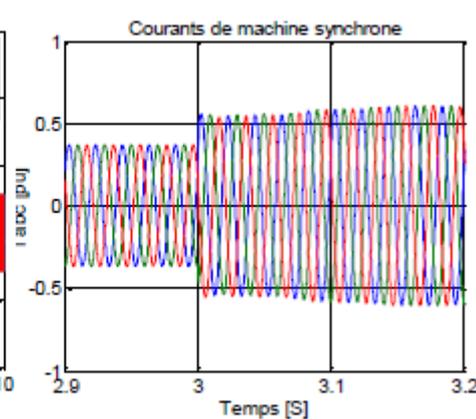
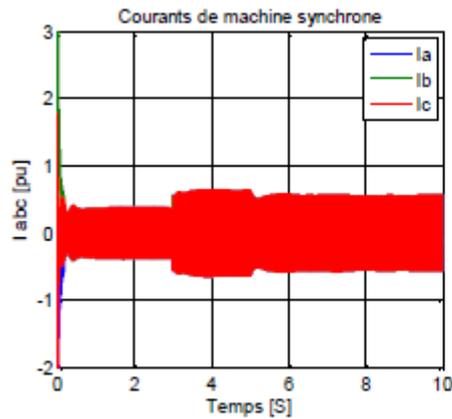


Figure IV.24 : Les courants de GD Figure IV.25 : Zoom des courants de GD

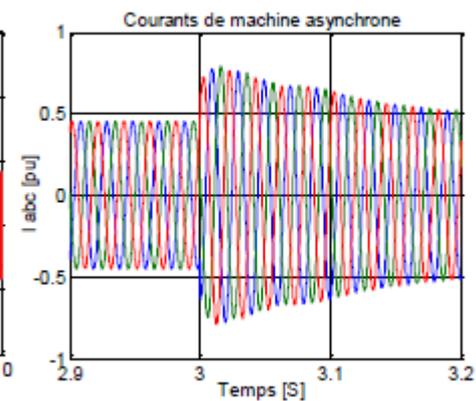
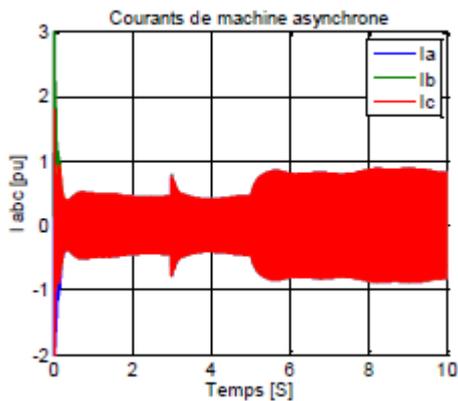


Figure IV.26 : Les courants de l'éolienne Figure IV.27 : Zoom des courants de l'éolienne

D'après les résultats obtenus on remarque que, la GAS reliée à la turbine fonctionne à une vitesse qui est légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme (figure IV.16).

On remarque qu'à l'instant $t=3s$ la puissance totale de la charge est de 250kW et selon la caractéristique de la turbine, pour une vitesse de vent à 8m/s, la puissance générée par le générateur éolien est de 100kW, cette dernière est inférieure à la puissance totale de la charge, pour cela et à cet instant la puissance générée par le groupe diesel augmente (figure IV.15) afin de satisfaire la demande.

Dans la même figure à l'instant $t=5s$, on remarque que si la vitesse du vent augmente de [0 à 10m/s], la puissance fournie par le système éolien augmente, la puissance fournie par le groupe diesel diminue, ce qui entraîne une diminution de la consommation du carburant s'accompagnent à une diminution proportionnelle des émissions de gaz toxiques (gaz à effet de serre) et inversement si la vitesse du vent diminue la puissance de la GAS diminue, la puissance de groupe diesel augmente pour garantir la puissance demandée par la charge. La vitesse du moteur diesel est toujours maintenue constante (figure IV.17). La figure IV.19 montre la puissance réactive nécessaire générée par le système diesel afin d'amorcer la génératrice asynchrone. Les tensions et les courants de la charge gardent ses formes sinusoïdales voir (figure IV.20, figure IV.22).

La figure IV.21 et figure IV.23, figure IV.25 et figure IV.27 montre le zoom de chaque courbe.

La figure IV.24 et figure IV.26 présente la courbe de courant de GD et l'éolien.

La figure IV.18 montre que le régulateur de fréquence maintient la fréquence de la charge à autour 50Hz, après la variation dans la charge, ce qui garantit une stabilité de système.

La régulation de la fréquence et de tension est assurée respectivement par la charge secondaire et le régulateur de tension du moteur diesel.

La complexité du système à savoir l'ajout d'autres générateurs d'énergie en parallèle avec le générateur diesel nécessite l'application d'un système de commande capable de garantir le contrôle idéal de la production d'énergie de tous les composants, Le Matlab/Simulink toujours nous permet de le faire dans des futurs travaux de recherches.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre une brève description d'un système hybride de génération de l'énergie électrique est réalisée, les principales notions liées au type d'architecture de système ont été aussi présentés. Deux applications d'un système hybride ont été élaborées, une première sur l'environnement HOMER pour une optimisation d'un système hybride au site de la ville de Ghardaïa, où les données météo logiques comme le rayonnement solaire et la vitesse du vent sont disponibles, un deuxième sous l'interface Simulink du Matlab pour un système hybride éolien diesel. D'après les résultats, on remarque que la combinaison des sources d'énergie renouvelables dans la présence d'une source classique d'origine fossile à un avantage remarquable dans la diminution de l'utilisation de cette dernière, afin de diminuer l'émission de gaz à effet de serre, en plus la diversité des ressources énergétiques que présente un système hybride, la continuité et la disponibilité de la production d'énergie électrique est assurée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Le but du travail présenté dans ce mémoire, est l'étude des systèmes hybrides de génération de l'énergie électrique pour l'alimentation des sites isolés, avec comme objectif de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal de systèmes hybrides afin de réduire les émissions des gaz à effets serre.

On a dressé un rappel sur les différents types des énergies renouvelables suivi par un état de l'art sur les systèmes hybrides de génération d'énergie électrique ainsi que les différents éléments qui les construisent. L'étude d'une centrale de production électrique hybride, qui combine entre deux sources d'énergies renouvelables avec stockage et un groupe électrogène de secours a été étudié. Nous avons simulé le système hybride (éolienne – photovoltaïque - groupe diesel) sous le logiciel Matlab-Simulink.

A partir de ces données indispensables, on a dimensionné le champ photovoltaïque, la turbine éolienne avec son générateur et un groupe diesel qui convient à notre installation.

Nous avons présenté une étude de simulation pour un système hybride éolien diesel photovoltaïque avec la présence des batteries et des convertisseurs, pour l'alimentation d'une charge donnée dans un concept autonome. La simulation est faite par le logiciel HOMER, qui nous permet de traiter des résultats réels basés sur des contraintes de coût et de variations d'entrées météorologiques d'un site situé dans la ville de Ghardaïa. Les résultats obtenues favorisent la production éolienne dans ce site isolé, et permet de nous donner l'avantage d'étudier profondément le fonctionnement d'un système éolien-diesel qui satisfait nos besoins de l'énergie dans les régions éloignées de ville Ghardaïa par le logiciel Matlab/Simulink.

D'une manière générale le travail présenté dans ce mémoire nous a permis de montrer l'intérêt que suscitent les énergies renouvelables dans notre pays l'Algérie. Néanmoins, tous ces résultats n'excluent pas des améliorations qui peuvent être apportées dans le futur de notre travail. Il s'agit en fait des points suivants :

- L'étude des commandes avancées pour l'implantation des systèmes hybrides afin d'améliorer la qualité d'énergie.
- Développement et mise en œuvre d'un banc d'essai d'un système hybride éolien-diesel.

- Une intégration d'un système hybride éolien- diesel- photovoltaïque dans notre ville de Ghardaïa avec le suivi du point de puissance maximale (MPPT : Maximum Power Point Tracking).

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: « Photovoltaic's systems ; a buyer's guide. Natural resources Canada », Renewable and electrical energy Division, 580 Booth Street, 17th floor Ottawa, Ont KIA OE4. ISBN0-662-31120-5.
- [2]: Mann Mk, « Economics of renewable hydrogen it's about more than production ». Renewable hydrogen energy forum, Washington.
- [3]: Le Gallau F., B. Bouchon-Meunier (Coordonnateurs) : « Systématique – Théorie et Applications ». Editions Tec & Doc, Paris, 1994, 341 pages.
- [4]: Vaughn C. Nelson, Ken L. Stracher, Robert E. Foster, R. Nolon Clark, Deon Raubenheimer, « wind hybrid systems technology characterization », West Texas AM University – AEI, New Mexico State University – SWTDI, USDA – ARS Bushland Vista University, May 2002.
- [5]: E. Ian Baring – Gould, L. Flowers, P. Lundsager, « Worldwide status of wind-diesel applications », PrWoeckshop Wind- Diesel 101, 2004, Anchorage, Alaska.
- [6]: Musseli, M., Notton, G. & Louche, A, « Desing of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management », Solar Energy, Vol.65, No.3, 1999, pp. 143-157.
- [7]: Ashok, S., « Optimised model for community-based hybrid energy system », Renewable Energy Vol.32, No.7, 2007, pp. 1155-1164.
- [8]: J. Labbé, « L'hydrogene electrolytique comme Moyen de Stockage d'electricité pour systèmes Photovoltaïque Isoles », Thèse de doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, pp. 5-17-18-21-50-68-69, 21 décembre 2006.
- [9]: M. Hurat, « Guide des énergies renouvelables », Association pour la Promotion des Energies Renouvelables, Ministère de la Région Wallonne éditeur, 1994.
- [10]: J. Muller, R. Desserrières, « Conversion photovoltaïque », publié par : Club CRIN, 2002.
- [11]: C. Alonso, J. Alzeu, C. Andrieu, S. Astier, J. Bonal, A. H. Ben, C. Comber, F. Costa, B. Dakyo, R. Desserrières, J. Fonio, O. Gergud, C. Glazie, J-C. Muller, B. Multon, C. Nichita, X. Robom, P. Rossiiti, « L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables », ECRIN, ISBN : 2-912154-08-1, Paris, 2002.
- [12]: F. Benyarou « Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen Juillet 2004

- [13]: A. ABDELLI, « optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse de Doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse, p 9-13-15 octobre 2007.
- [14]: P. Lundsager, H. Bindner, N. Clausen, S. Frandsen, L. H. Hansen, « Isolated systems with wind power », Riso-R-1256(EN), 2001.
- [15]: P. Bauer, S. W. H. De Haan, C. R. Meyl, JTG. Pierik, « Evaluation of Electrical Systems for offshore Windfarms », CDROM of the IFFF IAS Conf., oct. 2000
- [16]: Isabelle Duffaure-Gallais « La première pile à combustible installée en France », CSTB Magazine, 1999
- [17]: I. Kamawa, B. Saulier, « Modélisation, simulation et régulation d'un réseau éolien/diesel autonome », Rapport N° IREQ4340, Varennes, Canada, 1989.
- [18]: Michel Vandenberg, « systèmes hybrides PV/Diesel pour l'électrification rurale » Institut für Solar Energie (ISET) e. V. Königstor 59 D-34119 Kassel (Germany).
- [19]: M. Pipattanasomporn, "A study of a remote area internet access with embedded power generation," Master of Science, Virginia Polytechnic Institute, 2004.
- [20]: Haizea Gaztañaga Arantxamendi, "Etude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux microréseaux," Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [21]: Ionel Vechiu, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome," Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2005.
- [22]: J.F Fauvarque, "L'électrochimie et ses applications," L'actualité chimique, Rhone Poulenc, Novembre 1988.
- [23]: A. Nourai, B.P. Martin, D.R. Fitchett, "Testing the Limits," IEEE Power & Energy magazine, Mars/Avril 2005.
- [24]: Dalia N. Hussein, M.A.H. El-Sayed, H.A. Attia, "Optimal Sizing and Siting of Distributed Generation," The Eleventh International Middle East Power Systems Conference, El-Minia, Egypt, Décembre 2006.
- [25]: P.F. Ribeiro, B.K. Johnson, M.L. Crow, A. Arsoy, Y. Liu, "Energy Storage Systems for Advanced Power Applications," Proceedings of the IEEE, Vol 89, No 2, Décembre 2001.
- [26]: Cours d'Electronique De Puissance, IUT Génie Electric et Informatique Industrielle GEII – 2ième année – Option Electrotechnique et électronique de puissance (EEP), 2004/2005.
- [27]: Bendib Douadi, "Etude et réalisation d'une commande MLI on-line sur circuit FPGA," Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.
- [28]: J.R. Espinoza, "Inverters" In: M.H.Rashid, "Power Electronic Handbook", Academic Press, California, USA, 2001, pp 225-269.

- [29]: H. Foch, F. Forest et T. Meynard, "Onduleurs de tension. Structures. Principes. Applications," Techniques de l'ingénieur, vol. D31, N0 D3176, Novembre 1998.
- [30]: Laroche Jacques, "L'électronique de puissance, cours et exercices corrigés," Edition Dunod, Paris, France, 2004.
- [31]: Cours Energie et convertisseurs d'énergie, Licence EEA, Université de Savoie.
- [32]: J. G. McGowan, J. F. Manwell, « hybrid/PV/Diesel system experiences », Renewable Energy, 16, 928-933, 1999.
- [33]: F. Valenciaga, P. F. Puleston « Supervision Control for Stand-Alone Hybrid Generation System Using Wind and Photovoltaic Energy » IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2005
- [34]: K. Agbossou, M. Kolhe, J. Hamelin, T. K. Bose « Performance of a Stand- Alone Renewable Energy System Based On Energy Storage as Hydrogen » IEEE Transactions on Energy Conversion, Sept 2004.
- [35]: D.B. Nelson, M. H. Nehrir, C. Wang « Unite Sizing and Cost Analysis of Stand-Alone Hybrid Wind/PV/Fuel Cell Power Generation systems » Renewable Energy, August 2005.
- [36]: M. J. Khan, M.T. Iqbal « Dynamic Modeling and Simulation of a Small Wind-Fuel Cell Hybrid Energy System » Renewable Energy, 30, 2005.
- [37]: T. S. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, T. Funabashi « A hybride power system Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island » IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2005.
- [38]: Wichert, « PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation-A review of current practice and futur developments », Renewable nad Sustainable Energy Reviews, 1997, vol. 1. No. 3, pp. 209-228, Elsevier Science 1997.
- [39]: K. Preiser, L. Anoton. G. Bopp, K. V Dohlen, « Photovoltaic's, Hydropower and Gas generator » The Hybrid Energy System in Kaysersberg (France), 14th EPVSEC, Barcelona, Spain, 1997, pp. 1106-1109.
- [40]: Wemer. Kleinkauf, Gunther. Cramer, Mohamed, Ibrahim, l'IEE-EVS, Institut de technologie des énergies électriques, Université Kassel ans SMA Technologie AG.
- [41]: K. Burges et al., « Modular hybrid Energy Supply System for Industrial Processes and Rural Electrification », Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production, Santorini, juin 1996.
- [42]: O. Ulleberg, « Stand-Alone power systems for the future : Optimal design, operation & control of solar-Hydrogen energy systems », NTNU, Trondheim, NOVège, p201, 1998.

- [43]: M. Ashari, C. V. Nayar, « An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-Diesel-battery hybrid power system », *Renewable Energy*, Vol. 66, No. 1, pp. 12-27, Elsevier Science 1999.
- [44]: B. Wichert, « PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation-A review of current practice and futur developments », *Renewable nad Sustainable Energy Reviews*, 1997, vol. 1. No. 3, pp. 209-228, Elsevier Science 1993.
- [45]: M. Ashari, C. V. Nayar, « An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-Diesel-battery hybrid power system », *Renewable Energy*, Vol. 66, No. 1, pp. 1-9, Elsevier Science 1999.
- [46]: S. Ruin, O. Carlos, « Wind_hybrid systems with variable speed and Dc-link » *Wind power for the 21 Century*, Kassel, Germany, 25_27 sept 2000
- [47]: P. Lundsager, H. Bindner, N. Clausen, S. Frandsen, L. H. Hansen, J. C. Hansen, « Isolated systems with wind power », *Riso-R-1256(EN)*, 2001.
- [48]: Engler et al., « Control of Parallel Operation Battery Inverters », *PV Hybrid Power Systems 2000 Conference*, Aix-en-Provence, France, Sept 2000.
- [49]: A. Engler et al., « Standard Interface for PV and Hybrid Systems », *14th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelone, Espagne, pp. 1074-1077, juillet 1997.
- [50]: S. Roussin, « le journal semestriel des systèmes photovoltaïques hybrides au Canada », *Centre de Technologie de l’Energie de Canmet-Varenes Programme Photovoltaïque et Systèmes Hybrides*, page 4, Numero 7, Eté 2004.
- [51]: I. Vechiu, « Modelisation et Analyse de L’integration des Energies Renouvelables Dans un Réseau Autonome », *Thèse Doctorale à l’Université de Havre*, p 14-15-16-27, décembre 2005.
- [52]: J. Virgone, E. Fabrizio, Y. Raffanel, E. Blanco, G. Thomas « Commande des systèmes multi-énergies pour les bâtiments à haute performance énergétique », *Journée thématatique SFT-IBPSA mars 2006*.
- [53]: François Ruelle, “Le standard « maison passive » en Belgique : potentialités et obstacles,” *Master en Sciences et Gestion de l’Environnement*, Université Libre de Bruxelles, Belgique, 2008.
- [54]: Stéphane THIERS, “Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive,” *Thèse de Doctorat*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 2008.
- [55]: Yasmine Guyot, Arthur Giavitto, Axel Le Pennec, Briec Pey, David Nicolas, “Les bâtiments à bilan énergétique positif,” *Rapport projet environnement*, Ecole Nationale Supérieure Saint-Etienne, France, 2009.

- [56]: K. Voss, et M. Kramp, "Zero-energy/emission-buildings," Definitions and building practices, Actes de la conférence Centreal Europe towards Sustainable Building (CESB 07), Prague, 2007, pp. 547-552.
- [57]: Bénéfices économiques d'un renforcement de la coopération des échanges au maghreb – Rapport définitif Juin 2010 SOFRECO.
- [58]: Long, D. H. (2007), un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation, PhD thesis, Ecole Doctorale EEATS.
- [59]: RTE, réseau de transport d'électricité. 2011. « bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande V d'électricité en France ». Tech. Rept. Réseau de transport d'électricité.
- [60]: Ministre de l'énergie et des mines « consommation énergétique finale da l'Algérie ». chiffre clé année 2005, site web : www.aprue.org.dz
- [61]: R. MISSAOUI BADREDDINE « Gestion énergétique optimisée pour un bâtiment intelligent multi-sources multi-charges : différents pricipes de validations », l'Ecole Doctorale 'Electronique, Electrotechnique, Autoùatique et Traitement de Signal' EEATS. Université de Grenoble. 2012.
- [62]: <http://www.maisonbbc.fr/spip.php?article21>
- [63]: <http://www.toutsurlisolation.com/Votre-projet-de-A-a-Z/L-isolation-dans-le-neuf/Maison-ecologique-maison-BBC/Conception-bioclimatique>
- [64]: http://www.cotemaison.fr/energie-chauffage-climatisation/maison-bbc-isoler-plus-et-mieux_16604.html#BgIo1ApDrUsY719z.99
- [65]: <http://www.toutsurlisolation.com/Isolation-thermique>
- [66]: http://conseils.xpair.com/consulter_savoir_faire/solutions-isolation-bbc/isolation-toiture-exterieur/1755.htm#1750
- [67]: <http://www.constructeur-maison-ecologique.fr/guide-de-construction/isolation-thermique.html>
- [68]: <http://www.isover.fr/Guide-de-l-isolation/Maison-basse-consommation/Isolation-d-une-maison-basse-consommation>
- [69]: R. A. Messenger et J. Ventre, Photovoltaïc systems engineering, Chapitre 7 : Stand-alone PV systems, 2e éd., CRC Press, 2005.
- [70]: «Consommation de certains produits électroménagers,» [En ligne]. Available: <http://eco-sapiens.com>.
- [71]: CAUE de Loire-Atlantique « construire sa maison », Produire son chauffage et son eau chaude - novembre 2010

- [72]: L. Chang, 'Systèmes de Conversion de l'Energie Eolienne', IEEE Canadian Review, pp. 1 – 5, 2002.
- [73]: S. Petibon, "Nouvelles Architectures Distribuées de Gestion et de Conversion de l'Energie pour les Applications Photovoltaïques", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Janvier 2009.
- [74]: Heuraux Christine, "Formation aux métiers de l'électricité : un projet pilote en Afrique de l'Ouest au service de l'électrification rurale", EDF, 21 et 23 mars 2011, Ouagadougou.
- [75]: M.A. Hamouda, M. Saïdi, A. Lachourene, C. Hamouda et A. Malek Etude et réalisation d'un système intelligent d'alimentation en énergie électrique d'une habitation en milieu urbain avec injection dans le réseau
- [76]: Mr. A. RUNGUDu, Mr. A. BAGRE, Dr. Yao Azoumah; Technologie Solaire cours 2012, dimensionnement PV
- [77]: J. G. McGowan, J. F. Manwell, "Hybrid/PV/Diesel system experiences", Renewable Energy, 16, 928-933, 1999.
- [78]: Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°2 (2010) 257 – 264 : Estimation de la puissance maximale produite par un générateur photovoltaïque M.Belhadj¹, T. Benouaz², A. Cheknane³ et S.M.A Bekkouche⁴. Laboratoire de Physique et Dispositifs à Semi-conducteurs, Université de Beshar, Algérie... (Reçu le 10 Janvier 2010-accépté le 28 Juin 2010)
- [79]: Comprendre l'énergie photovoltaïque, "Avantages et inconvénients du PV" : www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com.
- [80]: H. Hassini, "Modélisation, Simulation et Optimisation d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.
- [81]: S. Belakehal, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Juin 2010.
- [82]: S. Elaimani, "Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrales Dans un Réseau de Moyenne Tension", Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Décembre 2004.
- [83]: Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) 199 – 209 : Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, S. Moussa et M. R. Benhaddadi. Centre de Développement des Energies Renouvelables Ecole Nationale Polytechnique, Département de l'Energie Electrique, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada (reçu le 02 Mai 2006 - accepté le 30 Septembre 2006)
- [84]: Claude Chevassu cours sur les couplages des alternateurs

- [85]: Mémoire pour l'obtention du Master Spécialisé Génie Electrique Energétique et Energie Renouvelable (GEER) Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) Soutenu publiquement le 19 Septembre 2011. Bébé Magloire NAN NEUWOUH, Daniel YAMEGUEU. Thème : Analyse, Modélisation e simulation des systèmes hybrides PV/Diesel
- [86]: Buzduga Stefania Roxana, stage de recherche 2-30 Novembre 2012 GREAH, Université du Havre, Etude d'un système hybride photovoltaïque éolien – diesel – structure et dimensionnement, rapport de stage
- [87]: Modèle d'électrification rurale pour localités de moins de 500 habitants au Sénégal, Ministère de l'énergie de Mine –Sénégal, composante électrification rurale. Auteur : Zaida Assani Dahouénon. Juillet 2005-janvier 2006
- [88]: M. Rezkallah, "Amélioration de la Qualité d'Energie fournie au Réseau Autonome Hybride Eolien- Diesel ", Mémoire présenté à l'École de Technologie Supérieur, Montréal 2010.
- [89]: Le ministère de l'Energie et des Mines " Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique ", Algérie, Mars 2011.
- [90]: H.G.Beyer and C.Langer, « A Method for the Identification of Configurations of PV/Wind Hybrid Systems For the Reliable Supply of Small Loads », Solar Energy, Vol. 57, pp. 381-391, 1996.
- [91]: B. Fortunato, G. Mummolo and G. Cavallera, « Economic Optimisation of a Wind Power Plant For Isolated Locations », Solar Energy, Vol. 60, N°6, pp. 347-358, 1997
- [92]: (Bulletin des Energies Renouvelables Semestriel N° 17 2010)
- [93]: Kacem GAIRAA (Valorisation du gisement solaire de Ghardaïa),. Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables- Ghardaïa