

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

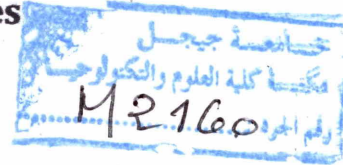


Université de Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Électronique



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de
Master II en Electronique
Option : Énergies Renouvelables

Thème:



**ÉTUDE TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE D'UN
SYSTÈME D'ÉNERGIE MULTISOURCES AVEC
ET SANS STOCKAGE D'ÉNERGIE**

Encadrées par

- Pr. Mellit Adel
- Dr. Rezzouk Hanane

Présenté par

- M^{elle} Kemel Mouna
- M^{elle} klikha khadidja

Promotion : Juin 2015.



Remerciements

Nous remercions le Dieu de nous avoir donné la volonté et la patience qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos chaleureux remerciements à nos encadreurs Mr. Mellit Adel, et M^{elle} Rezzouk Hanane qui nous ont guidé et orienté tout au long de la réalisation de ce travail en prodiguant leurs précieux conseils et leurs vifs encouragements.

Nous tenons à remercier, également, l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté de nous consacrer leur temps afin d'examiner et de juger ce travail.

Enfin nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidé de loin ou de près même par le simple mot d'encouragement Et tous les enseignants du département d'électronique et Génie Mécanique.





Dédicaces

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédié du fond du cœur à ceux qu'on aime.

Je dédié ce lapidaire travail :

*A mes très chers parents qui m'ont guidés durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma **Mère** celle qu'a servi de ces plus ambles intentions pour me permettre de goûter la fadeur de ce monde sans lisières, qui a été à mes Côtés et ma soutenu durant toute ma vie. Et mon **Père** qui a sacrifier toute sa vie afin de me voir devenir ce qui je suis, merci mes parents.*

*A ma chère sœur **Razika**.*

*A toute ma famille **Kemel** et la famille **Merzouk** sans exception*

*A mes deux encadreurs **Mr: Mellite Adel**.*

M^{lle}: Rezzouk Hanane

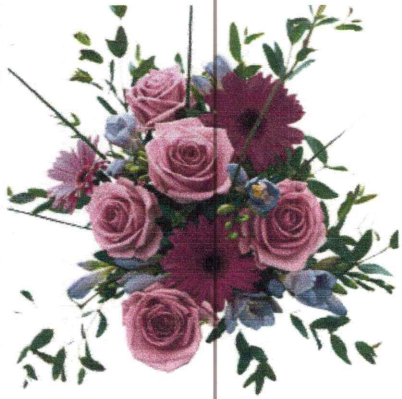
A tous mes collègues et mes amis partout.

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour le science et a tous qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail, de près ou de loin.

إن الذين نحبهم ونعزهم مكانتهم ليست بين الأسطر والصفحات لأن مقامهم
أجل وأعلى فالقلب سكناهم والذكرى ذكراهم، والقلب لن ينساهم.



Kemel Mouna



Dédicaces

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime.

Je dédie ce lapidaire travail :

*A mes très chers parents qui m'ont guidés durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma **Mère** celle qu'a servi de ces plus ambles intentions pour me permettre de goûter la fadeur de ce monde sans lisières, qui a été à mes Côtes et ma soutenu durant toute ma vie. Et mon **Père** qui a sacrifier toute sa vie afin de me voir devenir ce qui je suis, merci mes parents.*

A mes chers frères.

A mes cheres sœur.

*A toute ma famille **Klikha** et la famille **Zeghloul***

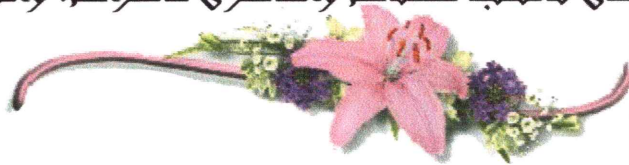
*A mes deux encadreur **Mr: Mellite Adel.***

M^{lle}: Rezzouk Hanane

A tous mes collègues et mes amis partout.

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour le science et a tous qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail, de près ou de loin.

إن الذين نحبهم ونعزهم مكانتهم ليست بين الأسطر والصفحات لأن مقامهم
أجل وأعلى فالقلب سكناهم والذكرى ذكراهم، والقلب لن ينساهم.



Klikha Khadidja

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I

Etat de l'art des systèmes d'énergie hybrides.

Introduction.....	3
I.1 Définition et mission des systèmes hybrides.....	3
I.1.1 Définition.....	3
I.1.2 Missions et avantages d'un système d'énergie hybride.....	5
I.2 Configurations d'un système hybride.....	5
I.2.1 Configuration à bus continu.....	5
I.2.2 Configuration à bus AC.....	6
I.2.3 Configuration hybride AC-DC.....	6
I.3 Principaux composants des systèmes hybrides.....	7
I.3.1 Générateur photovoltaïque.....	8
I.3.1.1 Définition.....	8
I.3.1.2 Constituants de base d'une cellule PV.....	9
I.3.2 Le générateur éolien.....	9
I.3.2.1 Constituants d'une éolienne.....	10
I.3.2.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	11
I.3.3 Générateurs diesel.....	11
I.3.4 Batteries.....	12
I.3.5 Convertisseurs de puissance.....	12
I.3.6 Système de supervision.....	12
I.4 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH.....	13
I.5 Mise en œuvre d'un système d'énergie hybride.....	14
Conclusion.....	15

CHAPITRE II

Modèles mathématiques des composants du système d'énergie hybride.

Introduction.....	17
II.1 Système photovoltaïque.....	17
II.1.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	17

II.1.1.1 Modélisation électrique d'une cellule PV.....	17
II.1.1.2 Caractéristique électriques d'une cellule PV.....	19
II.1.2 Module photovoltaïque.....	22
II.1.2.1 Champ photovoltaïque.....	23
II.1.2.2 Modélisation du module PV.....	23
II.2 Modélisation du générateur éolien.....	28
II.2.1 Puissance énergétique disponible	28
II.2.2 Puissance éolienne moyenne utilisable.....	30
II.3 Modélisation du générateur diesel.....	31
II.3.1 Description du cycle du moteur diesel.....	31
II.3.2 Taux de consommation de carburant	32
II.3.3 Cylindrée unitaire.....	32
II.3.4 La puissance.....	32
II.3.5 Le rendement	32
II.3.5.1 Le rendement thermique η	33
II.3.5.2 Le rendement volumétrique.....	33
II.3.5.3 Le rendement mécanique.....	33
II.4 Modélisation des batteries.....	34
II.4.1 Les principales caractéristiques d'une batterie.....	35
II.4.1.1 La charge.....	35
II.4.1.2 La décharge.....	35
II.4.1.3 La durée de vie.....	36
II.4.1.4 Le rendement.....	36
Conclusion	36

CHAPITRE III

Outils logiciels pour les systèmes d'énergie renouvelables hybrides.

Introduction.....	37
III.1 Classification des outils logiciels.....	37
III.1.1 Logiciels de préféabilité.....	37
III.1.2 Logiciels de dimensionnement.....	38
III.1.3 Logiciels de simulation	38

III.1.4 Logiciels de Recherche à Architecture Ouverte.....	39
III.2 Outils logiciels pour les systèmes d'énergie hybrides.....	39
III .2.1 RETScreen.....	39
III.2.2 LEAP.....	40
III.2.3 iHOGA (improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms).....	41
III.2.4 HOMER.....	42
III.2.5 HYBRID2	48
III.2.6 TRNSYS (Transient Energy System Simulation Program).....	50
III.2.7 RAPSIM (Remote Area Power Supply Simulator).....	51
III.2.8 SOMES (Simulation and Optimization Model for Renewable Energy Systems)....	51
III.2.9 SOLSIM	51
III.2.10 INSEL (Integrated Simulation Environment Language).....	52
III.2.11 ARES (Autonomous Renewable Energy Systems).....	52
Conclusion.....	53

CHAPITRE IV

Etude technique et économique des différentes configurations du système d'énergie .

Introduction.....	54
IV.1 Caractéristiques géographiques du site.....	55
IV.2. Application au site.....	55
IV.2.1 Architecture du système hybride.....	56
IV.2.1.1 Modules photovoltaïques.....	57
IV.2.1.2 Les batteries électrochimiques.....	57
IV.2.1.3 Convertisseur de puissance	57
IV.2.1.4 Générateur diesel.....	57
IV.2.1.5 Générateur éolien.....	58
IV.2.2 Stratégie de contrôle et de gestion du système hybride.....	58
IV.2.3 Evaluation de la ressource solaire	58
IV.2.4 Evaluation de la ressource éolienne	60

IV.2.5 Description du Profil de Charge.....	60
IV.2.6 Spécifications techniques et économiques du système d'énergie hybride.....	61
IV.2.7 Prix du diesel.....	62
IV.2.8 Durée de vie du projet.....	63
IV.3 Etude des systèmes énergétiques.....	63
IV.3.1 Systeme Diesel Autonome.....	63
IV.3.2 Système PV autonome.....	66
IV.3.3 Système éolien autonome.....	69
IV.3.4 Systèmes hybrides PV-diesel avec stockage.....	71
IV.3.5 Système hybride PV-diesel sans stockage.....	75
IV.3.6 Systèmes hybrides éolienne-diesel avec stockage.....	79
IV.3.7 Systèmes hybrides éolienne-diesel sans stockage.....	83
IV.3.8 Systèmes hybrides PV-éolienne avec stockage.....	87
IV.3.9 Systèmes hybrides PV-éolienne-diesel avec stockage.....	91
IV.3.10 Systèmes hybrides PV-éolienne-diesel sans stockage.....	95
IV.4 Etude comparative entre les différents systèmes	100
Conclusion.....	101
Conclusion générale.....	102
Références bibliographiques.	

List des figures

Figure I.1 : Schéma d'une installation type d'un système hybride (PV- éolienne – groupe diesel).	4
Figure I.2 : Structure d'une configuration DC d'un SEH.....	6
Figure I.3 : Structure d'une configuration AC d'un SEH.....	6
Figure I.4 : Structure d'une configuration hybride d'un SEH.....	7
Figure I.5 : Constituants de base d'une cellule PV.....	9
Figure I.6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	10
Figure I.7 : Principaux composants d'une éolienne.....	10
Figure I.8 : Configuration de générateur diesel.....	11
Figure I.9 : Architecture du système de supervision d'un SEH.....	13
Figure II.1 : Circuit électrique simple de la cellule PV.....	18
Figure II.2 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV.....	19
Figure II.3 : Courbe électrique courant-tension spécifique à chaque type de cellule.....	21
Figure II.4 : Module PV constitué de NP branches parallèles avec NS cellules séries.....	22
Figure II.5 : Circuit équivalent d'une cellule PV.....	24
Figure II.6 : Effet de la résistance série ($1\text{KW}/\text{m}^2$, 25°C).....	26
Figure II.7 : Caractéristique I-V du module PV BP MSX120 ($G=1\text{KW}$, $T=25^\circ\text{C}$).....	27
Figure II.8 : Effet de la variation de la température et de l'irradiation sur le courant et la puissance de sortie du module PV.....	28
Figure II.9 : Coefficient de puissance.....	29
Figure II.10 : Courbe de puissance.....	31
Figure II.11 : Diagramme de Clapeyron théorique du cycle d'un moteur à 4 temps.....	31
Figure II.12 : Schéma électrique équivalent de nb élément de batteries en série.....	34

Figure II.13 : Evaluation de la tension de la batterie durant la charge et la décharge.....	36
Figure III.1 : Organigramme de l'analyse standardisée du logiciel RETScreen.....	40
Figure III.2 : Espace de travail du logiciel LEAP.....	41
Figure III.3 : Espace de travail du logiciel Ithoga.....	42
Figure III.4 : Espace de travail du logiciel HOMER.....	44
Figure III.5 : Schéma explicatif des processus simulation, optimisation et analyse de sensibilité du logiciel HOMER.....	48
Figure III.6 : Schéma descriptif du logiciel HOMER.....	48
Figure III.7 : Espace de travail du logiciel HYBRID2.....	50
Figure III.8 : Espace de travail du logiciel TRNSYS.....	51
Figure III.9 : Espace de travail du logiciel INSEL.....	52
Figure IV.1 : Structure du système hybride PV-Diesel-Eolienne.....	57
Figure IV.2 : Irradiation solaire globale reçue sur un plan horizontal.....	59
Figure IV.3 : Irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné égal à la latitude du lieu.....	59
Figure IV.4 : Vitesse du vent du site de l'UDES.....	60
Figure IV.5 : Profil de charge	61
Figure IV.6 : Architecture du système diesel autonome.....	63
Figure IV.7 : Production énergétique mensuelle moyenne du système diesel autonome.....	64
Figure IV.8 : Coût Net Actuel du système diesel autonome en fonction des différents coûts de cycle de vie.....	65
Figure IV.9 : Coût Net Actuel du système diesel autonome en fonction des coûts des composants du système.....	65
Figure IV.10 : Architecture du système PV autonome.....	66
Figure IV.11 : Production énergétique mensuelle du système PV autonome.....	67

Figure IV.12 : Coût Net Actuel du système PV autonome en fonction des coûts des composants du système.....	68
Figure IV.13 : Coût Net Actuel du système PV autonome en fonction des différents coûts de cycle de vie.....	69
Figure IV.14: Architecture du système éolienne autonome.....	69
Figure IV.15 : Production énergétique mensuelle du système éolien autonome.....	70
Figure IV.16 : Coût Net Actuel du système éolien autonome en fonction des coûts des composants du système	71
Figure IV.17 : Coût Net Actuel du système éolien autonome en fonction des différents coûts de cycle de vie.....	71
Figure IV.18 : Architecture du système hybride 38%PV-diesel-batterie.....	72
Figure IV.19 : Production énergétique mensuelle du système hybride 25% PV-diesel-batterie.....	72
Figure IV.20 : Production annuelle du système PV.....	73
Figure IV.21 : Production annuelle du générateur diesel	73
Figure IV.22 : Etat de charge annuel du système de stockage.....	73
Figure IV.23 : Coût Net Actuel du système 38%PV-diesel-batterie en fonction des différents coûts de cycle de vie.....	74
Figure IV.24 : Coût Net Actuel du système 38%PV-diesel-batterie en fonction des coûts des composants du système.....	75
Figure IV.25 : Architecture du système hybride 36%PV-diesel	76
Figure IV.26 : Production énergétique mensuelle du système hybride 25%PV-diesel.....	76
Figure IV.27 : Production annuelle du système PV.....	76
Figure IV.28 : Production annuelle du générateur diesel.....	77
Figure IV.29 : Coût Net Actuel du système 36%PV-diesel en fonction des différents coûts de cycle de vie.....	78

Figure IV.30 : Coût Net Actuel du système 36% PV-diesel en fonction des coûts des composants du système.....	78
Figure IV.31 : Architecture du système hybride 46% éolienne-diesel-batterie.....	80
Figure IV.32 : Production énergétique mensuelle du système hybride 46%éolienne -diesel-batterie.....	80
Figure IV.33 : Production annuelle du système éolien.....	80
Figure IV.34 : Production annuelle du générateur diesel.....	81
Figure IV.35 : Etat de charge annuel du système de stockage.....	81
Figure IV.36 : Coût Net Actuel du système 46%éolienne-diesel-batterie en fonction des différents coûts de cycle de vie.....	82
Figure IV.37 : Coût Net Actuel du système 46%éolienne-diesel-batterie en fonction des coûts des composants du système.....	83
Figure IV.38 : Architecture du système hybride 27% éolienne-diesel.....	84
Figure IV.39 : Production énergétique mensuelle du système hybride 27% éolienne -diesel.....	84
Figure IV.40 : Production annuelle du système éolien.....	84
Figure IV.41 : Production annuelle du générateur diesel.....	85
Figure IV.42 : Coût Net Actuel du système 27%éolienne-diesel en fonction des différents coûts de cycle de vie.....	86
Figure IV.43 : Coût Net Actuel du système 27%éolienne-diesel en fonction des coûts des composants du système.....	86
Figure IV.44 : Architecture du système hybride 54%PVet 46%éolienne-batterie.....	88

Figure IV.45 : Production énergétique mensuelle du système hybride 54%PVet 46%éolienne –batterie.....	88
Figure IV.46 : Production annuelle du système PV.....	88
Figure IV.47: Production annuelle de l'éolienne.....	89
Figure IV.48 : Etat de charge annuel du système de stockage.....	89
Figure IV.49 : Coût Net Actuel du système 54%PVet 46%éolienne-batterie en fonction des différents coûts de cycle de vie.....	90
Figure IV.50 : Coût Net Actuel du système 54%PVet46%éolienne-batterie en fonction des coûts des composants du système.....	90
Figure IV.51 : Architecture du système hybride 34%PV-42% éolien- diesel-batterie....	92
Figure IV.52 : Production énergétique mensuelle du système hybride 69%PV-9%éolien- diesel-batterie.....	92
Figure IV.53 : Production annuelle du système PV.....	92
Figure IV.54 : Production annuelle du générateur diesel.....	93
Figure IV.55 : Etat de charge annuel du système de stockage.....	93
Figure IV.56 : Production annuelle du générateur éolien.....	93
Figure IV.57 : Coût Net Actuel du système 69%PV- 9% éolienne-diesel-batterie en fonction des différents coûts de cycle de vie.....	94
Figure IV.58 : Coût Net Actuel du système 69%PV-9% éolienne-diesel-batterie en fonction des coûts des composants du système.....	95
Figure IV.59 : Architecture du système hybride 35%PV-9% éolien- diesel.....	96
Figure IV.60 : Production énergétique mensuelle du système hybride 35%PV-9%éolien- diesel-batterie.....	96
Figure IV.61 : Production annuelle du système PV.....	97
Figure IV.62: Production annuelle du générateur diesel.....	97
Figure IV.63 : Production annuelle du générateur éolien.....	97

Figure IV.64 : Coût Net Actuel du système 35%PV- 9% éolienne-diesel en fonction des différents coûts de cycle de vie.....98

Figure IV.65 : Coût Net Actuel du système 35%PV-9% éolienne-diesel-batterie en fonction des coûts des composants du système.....99

Liste des tableaux

Tableau I.1	Classification des SEHs par gamme de puissance.....	4
Tableau III.1	Analyse des capacités et limites des outils logiciels pour SEHs	53
Tableau IV.1	Caractéristiques géographiques de site.....	55
Tableau IV.2	Irradiation solaire globale et indice de clarté du site de l'UDES.....	58
Tableau IV.3	Caractéristiques techniques et économiques des composants du système hybride.....	62
Tableau IV.4	Caractéristiques techniques et électriques du système diesel autonome.....	64
Tableau IV.5	Caractéristiques économiques du système diesel autonome.....	65
Tableau IV.6	Emissions du système diesel autonome	66
Tableau IV.7	Composants du système PV autonome.....	67
Tableau IV.8	Caractéristiques économiques du système PV autonome.....	68
Tableau IV.9	Composants du système éolien autonome.....	70
Tableau IV.10	Caractéristiques économiques du système éolien autonome	71
Tableau IV.11	Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique.....	74
Tableau IV.12	Caractéristiques économiques du système énergétique.....	74
Tableau IV.13	Emissions du système d'énergie hybride.....	75
Tableau IV.14	Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique.....	77
Tableau IV.15	Caractéristiques économiques du système énergétique.....	78
Tableau IV.16	Emissions du système d'énergie hybride.....	79
Tableau IV.17	Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique.....	81
Tableau IV.18	Caractéristiques économiques du système énergétique.....	82
Tableau IV.19	Emissions du système d'énergie hybride.....	83
Tableau IV.20	Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique.....	85
Tableau IV.21	Caractéristiques économiques du système énergétique.....	86

Tableau IV.22	Emissions du système d'énergie hybride.....	87
Tableau IV.23	Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique....	89
Tableau IV.24	Caractéristiques économiques du système énergétique.....	90
Tableau IV.25	Emissions du système d'énergie hybride.....	91
Tableau IV.26	Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique....	93
Tableau IV.27	Caractéristiques économiques du système énergétique.....	94
Tableau IV.28	Emissions du système d'énergie hybride.....	95
Tableau IV.29	Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique.....	97
Tableau IV.30	Caractéristiques économiques du système énergétique.....	98
Tableau IV.31	Emissions du système d'énergie hybride.....	99
Tableau IV.32	Comparaison entre les différents systèmes.....	100

Abréviations

SEH : système d'énergie hybride.

MPPT:(Maximum Power Point Trackers): suivi le maximal de la puissance produite.

PPM : point de puissance maximale.

CO₂ : le dioxyde de carbone.

GES : gaz à effet de serre.

DC : courant continu.

AC: courant alternatif.

GD : générateur diesel.

PV : photovoltaïque.

GW : générateur éolien.

GPV : générateur photovoltaïque.

PN : jonction.

PMH : le point mort haut.

PMB : le point mort bas.

EDC : l'état de charge de la batterie.

ER : énergie renouvelable.

O&M : le coût d'opération et de maintenance.

NPC : le coût total du système.

Bat : batterie.

Symboles

I_{ph} : le courant photo généré.

I_d : le courant de la diode.

V : la tension aux bornes de la diode (Volt) ;

n : le Coefficient d'idéalité de la diode $1 \leq n \leq 2$;

I_s : le courant de saturation inverse de la diode (A) ;

V_T : la potentielle thermodynamique.

K : la constante de Boltzmann: $K=1,38*10^{-23}J/^{\circ}K$.

T : la température absolue en Kelvin.

q : la charge de l'électron $q=1.602*10^{-19}C$.

R_s : résistance série;

R_p : résistance shunt.

FF : facteur de forme.

I_{cc} : le courant de court-circuit.

V_{co} : la tension de circuit ouvert.

T : la température de fonctionnement.

T_{ref} : la Température de référence de la cellule PV en (K) : $T_{ref} = 298^{\circ}K = 25^{\circ}C$

G_0 : Valeur nominale de l'irradiation: $G_0 = 1KW / m^2$

$f'(x_n)$: La dérivé de la fonction $f(x_n)$.

x_n : La présente itération.

x_{n+1} : L'itération suivante.

E_c : l'énergie cinétique.

m : masse d'air.

V : la vitesse du vent (m/s).

A : la surface traversée par le vent (m^2).

ρ : la densité de l'air ($= 1.225kg/m^3$).

C_p : coefficient de puissance.

Ω :Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne.

K : facteur de forme

C : facteur d'échelle.

dA : surface du tronçon de pale.

$l(r)$: longueur de la corde à la distance r de l'axe de rotation.

W : module du vent apparent.

V_d : la vitesse d'amorçage de l'éolienne ;

V_n : la vitesse nominale ;

V_m : la vitesse d'arrêt.

P_g : la puissance du groupe électrogène.

V_m : volume de chambre de combustion.

P_{me} : pression moyenne effective.

W_{cycle} : est le travail par cycle.

$n_{cycle/s}$: le nombre de cycle par second.

V : la cylindrée.

P : la puissance du moteur en W.

C : le couple en N.m.

Ω : vitesse angulaire du moteur en tr/min.

N : fréquence de rotation du moteur en tr/min.

Q_{ma} réelle : consommation massique d'air réelle du moteur en Kg /s.

Q_{ma} théorique : Consommation massique d'air théorique du moteur en Kg/s.

P_u : puissance utile.

P_i : puissance indiquée.

V_{bat} : la tension de la batterie en Volt.

$V_{co(t)}$: la tension de circuit ouvert au temps t en Volt.

$R_{bat}(t)$: la résistance interne de batterie en Ohms.

$I_{bat}(t)$: le courant de la batterie en Ampère.

Q : la quantité de charge manquante à la batterie.

t : la durée de charge ou décharge par la batterie.

Introduction générale.

Introduction générale.

La consommation mondiale d'énergie est en augmentation continue dans les pays développés et en voie de développement avec un taux de croissance annuel d'environ 1% et 5% respectivement. La civilisation moderne est fortement dépendante de l'énergie qui est, majoritairement, satisfaite par les ressources d'énergie fossiles (à environ 80%). Par conséquent, le monde aujourd'hui devrait faire face à un double défi; d'une part la dépendance quasi-totale des ressources fossiles pour produire de l'énergie conduira à l'épuisement des réserves, dans ce cas là, il est impérativement nécessaire de faire appel à de nouveaux moyens de production d'énergie à l'échelle mondiale. D'autre part, les émissions anthropiques issues de la combustion de combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel induisent des effets néfastes sur l'environnement et l'atmosphère qui sont responsables du changement climatique. La prise de conscience de l'impact des niveaux actuels de l'activité humaine sur l'environnement et l'épuisement des ressources énergétiques ont incités les secteurs concernés à développer des moyens plus efficaces de production d'énergie. Actuellement il y a une reconnaissance croissante de l'importance d'intégrer les énergies renouvelables (ERs) dans le secteur énergétique des pays qui visent à atteindre les objectifs d'un développement durable. Néanmoins, les moyens de production individuels tels que l'éolien et le photovoltaïque présentent des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, non corrélées à l'évolution de la charge. À cet effet l'idée de l'invention des systèmes d'énergie hybrides (SEH) a surgis.

Le système hybride présente en somme un double avantage servant à minimiser les perturbations de l'environnement grâce à une consommation sur le lieu de production de ressource naturelles renouvelables et d'une sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologique.

Le présent travail porte sur l'étude technique et l'optimisation économique d'un système hybride multi-sources PV-éolien-diesel-batteries.

Dans le premier chapitre, nous allons mener une recherche bibliographique sur les systèmes hybrides d'énergie renouvelable pour des sites isolés, en s'intéressant à l'état de l'art, en particulier les définitions et les missions des SEH et les principaux composants du système.

Le second chapitre sera consacré à la présentation des modèles mathématiques des composants constituant le système hybride: système PV, éolienne, générateur diesel, et batteries.

Dans le troisième chapitre nous allons faire un survol de logiciels d'étude, d'analyse et d'optimisation des systèmes d'énergie hybrides avec une comparaison de leurs capacités et limitations afin de pouvoir choisir le plus approprié pour notre étude.

Le dernier chapitre sera consacré à la présentation des résultats de simulation qui seront effectuées pour déterminer le système énergétique hybride le plus rentable, le choix sera effectué sur la base d'une comparaison économique des différentes configurations.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

Etat de l'art des systèmes d'énergie hybrides.

CHAPITRE I

Etat de l'art des systèmes d'énergie hybrides

Introduction

Dans la majorité des sites éloignés, le générateur diesel est l'élément essentiel pour la production d'énergie électrique. Pour ces sites, le prix de la distribution du réseau électrique est très cher et le prix du combustible augmente en fonction de l'éloignement du site. L'apparence des générateurs basés sur l'énergie renouvelable et la fiabilité croissante de ces systèmes ont conduit à une utilisation des sources d'énergie renouvelables dans les régions éloignées.

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est liée à la variabilité et à la nature intermittente des ressources. Les potentialités de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément adaptées avec les ressources.

Pour les sites éloignés, la meilleure solution à maintenir est, effectivement, le couplage entre plusieurs sources d'énergie renouvelables et conventionnelles par exemple des éoliens, des panneaux photovoltaïques et des générateurs diesel, des turbines à gaz, les piles à combustibles: ces structures sont appelées systèmes d'énergie hybrides.

I.1 Définition et mission des systèmes hybrides

I.1.1 Définition

Un système d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise différentes technologies de production énergétiques: une ou plusieurs sources de production d'énergie classiques (groupe diesel en général) avec une ou plusieurs sources d'énergies renouvelables, figure (I.1).

L'objectif d'utiliser des technologies multiples est de réunir les avantages et les meilleures caractéristiques opérationnelles de chaque système [1,2].

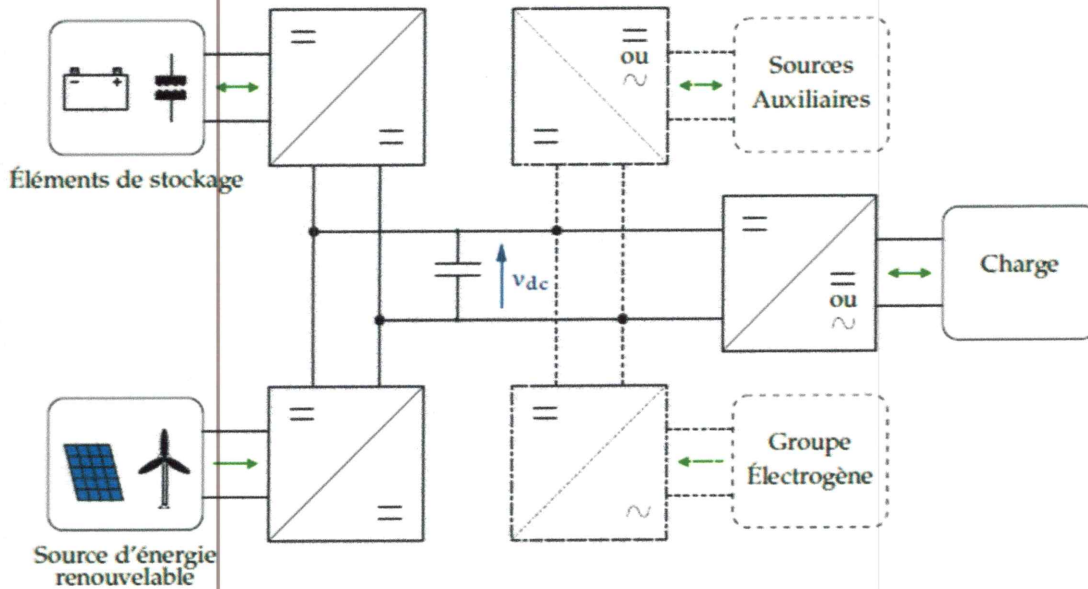


Figure I.1 : Schéma d'une installation type d'un système hybride (PV- éolienne – groupe diesel).

Les performances d'un SEH (rendement et durée de vie) sont influencées d'une part par sa conception, c.-à-d. le dimensionnement des composants, l'architecture, l'estimation du potentiel de la ressource énergétique et le profil de charge, et d'autre part par le choix de la stratégie de fonctionnement.

Lors de la conception d'un SEH; le but est de concevoir un système énergétique optimal qui répond à la demande de la charge électrique sous les contraintes de conception imposées par le concepteur à faible investissement: optimum technico-économique.

Le champ d'application des SEHs 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 SEHs par gamme de puissance [3].

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

I.1.2 Missions et avantages d'un système d'énergie hybride [3]

- L'utilisation des ressources naturelles qui sont gratuites et inépuisables et qui contribuent à la protection de l'environnement en réduisant les émissions des GESs en particulier le dioxyde de carbone (CO₂);
- Faible coût de l'énergie éolienne;
- La diversité et la sécurité d'approvisionnement;
- Déploiement rapide: modulaire et rapide à installer.

I.2 Configurations d'un système hybride

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Ces configurations constituées de différentes sources d'énergies comme les éoliennes, les systèmes PV, les batteries et les générateurs diesels se résument en trois types [4, 5,6]:

- Configuration à bus DC (bus à courant continu);
- Configuration à bus AC (bus à courant alternatif);
- Configuration à bus DC-AC (la connexion mixte, bus AC et bus DC).

I.2.1 Configuration à bus continu

Dans une configuration à bus continu, les différentes sources d'énergie sont connectées à un bus de courant continu par l'intermédiaire des circuits électroniques d'interface appropriés. S'il existe des charges en courant continu, elles peuvent également être connectées directement au bus de courant continu ou par l'intermédiaire des convertisseurs DC/DC pour atteindre la tension continue appropriée aux charges DC. Le système peut fournir l'énergie électrique pour les charges à courant alternatif (50 ou 60 Hz), ou être relié au réseau électrique par l'intermédiaire d'un onduleur qui peut être conçu pour permettre un transfert bidirectionnel de la puissance électrique. La structure d'une configuration DC d'un SEH est donnée par la figure (I.2).

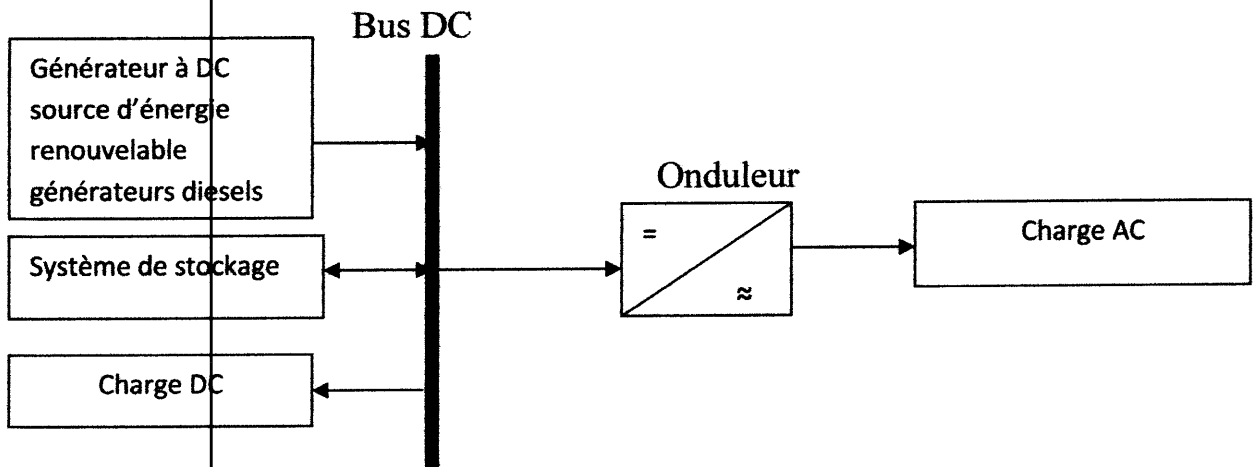


Figure I.2 : Structure d'une configuration DC d'un SEH.

I.2.2 Configuration à bus AC

Dans une configuration AC, les sources d'énergie sont connectées à un bus AC comme le montre la figure (I.3). Dans le cas où des sources d'énergie DC existent, des convertisseurs DC-AC sont utilisés pour convertir l'énergie DC en une énergie AC. Dans le cas de présence de batteries électrochimiques, on insère des convertisseurs AC-DC bidirectionnels. Ces convertisseurs peuvent également alimenter des charges continues.

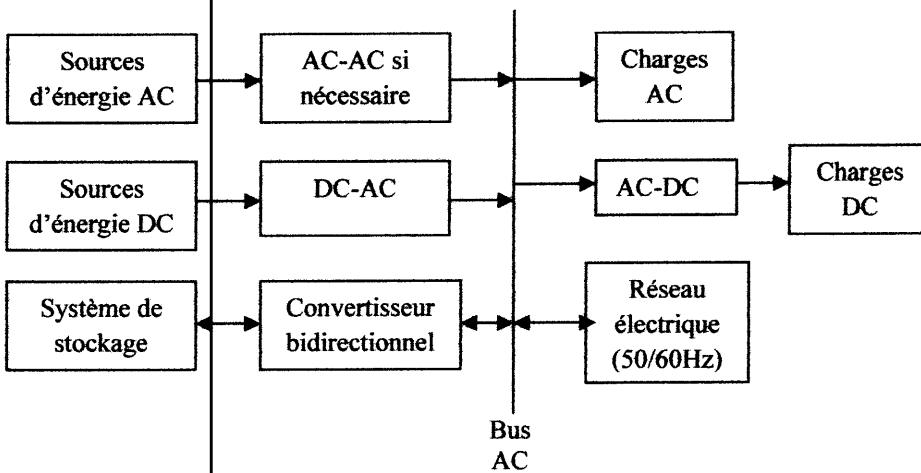


Figure I.3 : Structure d'une configuration AC d'un SEH.

I.2.3 Configuration hybride AC-DC

Au lieu de connecter toutes les sources d'énergie à un seul bus à courant continu ou à courant alternatif tel que présenté précédemment, les différentes sources d'énergie peuvent être connectées au bus DC ou AC du système hybride.

La figure (I.4) représente un système hybride où les ressources d'énergie sont connectées au bus de courant continu ou alternatif. Dans cette configuration, certaines sources d'énergie peuvent être intégrées directement sans circuits d'interface supplémentaires. Par conséquent le système peut avoir un rendement énergétique plus élevé et un coût réduit. L'inconvénient de cette configuration est que le contrôle et la gestion de l'énergie pourraient être plus compliqués que pour les configurations à bus DC et à bus AC.

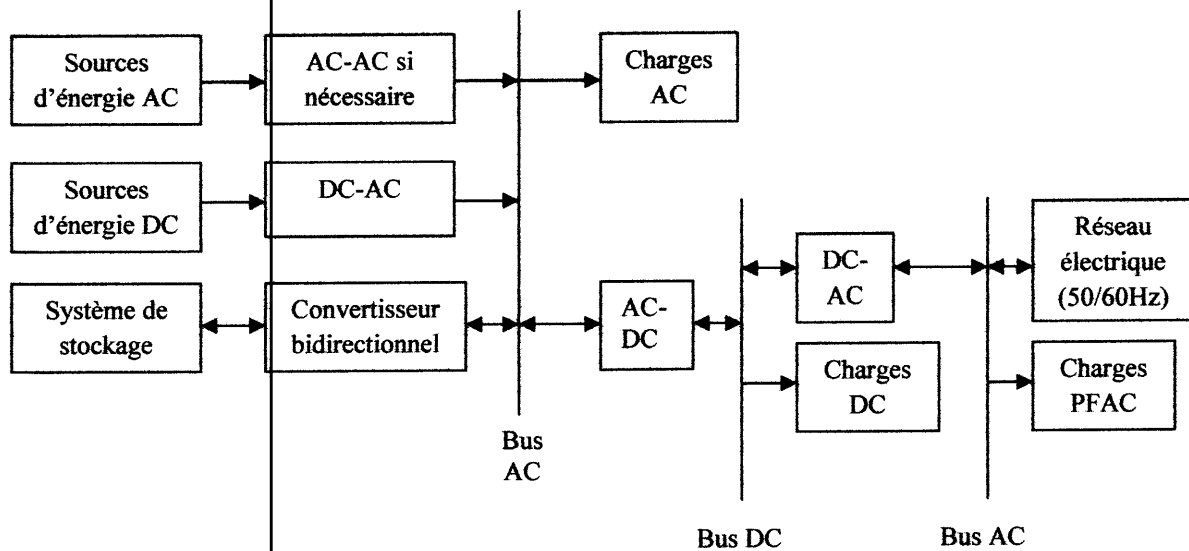


Figure I.4 : Structure d'une configuration hybride d'un SEH.

La sélection d'une configuration par rapport à une autre dépend de l'application ainsi que du type des sources d'énergie et des charges électriques. Si les sources de production d'énergie majeures du système hybride génèrent une puissance DC et il y a aussi des quantités substantielles de charges DC, alors on utilise ici un système à configuration DC.

D'autre part, si les principales sources d'énergie génèrent une puissance AC dans ce cas là un système à bus AC serait une bonne option. Si les sources d'énergie génèrent un mix de puissance AC et DC, une architecture d'intégration hybride peut être envisagée.

I.3 Principaux composant des systèmes hybrides

Un SEH peut inclure différents systèmes énergétiques tels que les générateurs photovoltaïques, les éoliennes, les turbines hydrauliques, les générateurs conventionnelsetc, ces systèmes incluent d'autres composants comme les convertisseurs de puissance, des batteries pour le stockage de l'énergie, et aussi bien des charges principales

et des charges de délestage. La majorité de ces éléments fonctionnent en parallèle pour former un système d'énergie équilibré.

I.3.1 Générateur photovoltaïque

I.3.1.1 Définition

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base de cellules photovoltaïques. Par définition, une cellule PV est un dispositif à base des matériaux semi-conducteurs (S/C) dans lequel se produit la conversion des photons constituant le rayonnement solaire en courant électrique par effet PV.

Cette transformation particulière d'énergie passe par les deux étapes décrites ci-dessous :

➤ Interaction Photon/Semi-conducteur et création de paires électron/trou

Pendant cette étape les photons, constituant la lumière, entrent en interaction avec le (S/C); ceux qui ont une énergie $E = h * \sigma$ supérieure à son gap vont être absorbés et leur énergie sera transférée aux électrons de la bande de valence. Avec cette énergie supplémentaire un électron de valence peut s'échapper de sa position normale dans l'atome créant ainsi un trou, un électron voisin vient combler cette vacance laissant derrière lui à son tour un trou, on aura ainsi établi un courant de trou dans la bande de valence et un courant d'électrons dans la bande de conduction. Donc l'interaction photon/e⁻ se traduit par la génération de paires électron/trou qui modifie la conductivité du matériau [7].

➤ Collecte des charges électriques générées dans le matériau

Pour pouvoir générer le courant de porteurs ainsi créés, il faut pouvoir les séparer afin d'éviter leur recombinaison. Ceci n'est possible que par l'application d'un champ électrique créé par une jonction PN réalisée par dopage du matériau de la cellule. Ce dopage est de deux types : un dopage de type N [adjonction du phosphore (P)] et un dopage de type P [adjonction du bore (B)].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones (N) et (P) et dans la zone de charge d'espace. Le comportement des photo-porteurs diffère suivant la région donnant ainsi un photo-courant de génération et un photo-courant de diffusion. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un courant I_{ph} proportionnel à l'intensité lumineuse [8, 9].

I.3.1.2 Constituants de base d'une cellule PV [10,11]

Bien que plusieurs structures de cellules PV existent, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. La figure (I.5) montre la coupe d'une cellule PV en silicium cristallin avec contacts métalliques sur les deux faces:

1. Contacts métalliques sur la face avant et arrière de la cellule qui servent à collecter le courant photo-généré;
2. Couche de passivation avant et arrière;
3. Couche antireflet;
4. Surface avant dopée n et texturée;
5. Jonction et champ électrique;
6. Substrat P;
7. BSF: « Back Surface Field », champ de surface arrière.

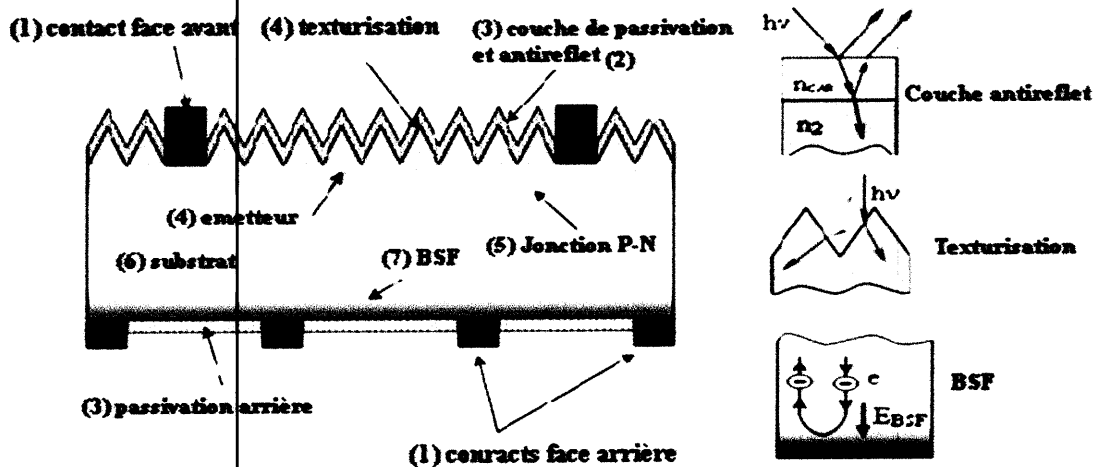


Figure I.5 : Constituants de base d'une cellule PV.

I.3.2 Le générateur éolien

Parmi les différents générateurs d'énergies renouvelables utilisés dans le système d'énergie hybride le générateur éolien dont son principe est basé sur la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique figure (I.6). L'éolienne est techniquement et économiquement la plus développée en comparaison avec les autres énergies renouvelables.

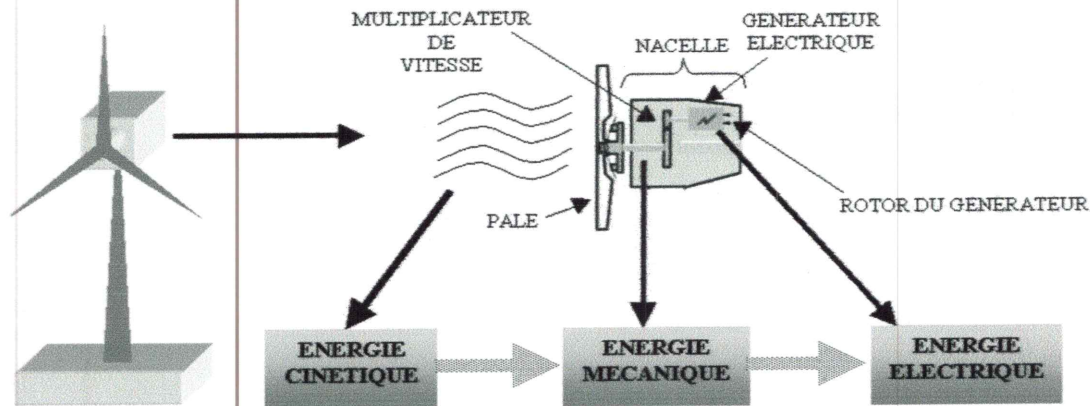


Figure I.6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.3.2.1 Constituants d'une éolienne

Une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux [12], comme le montre la figure (I.7):

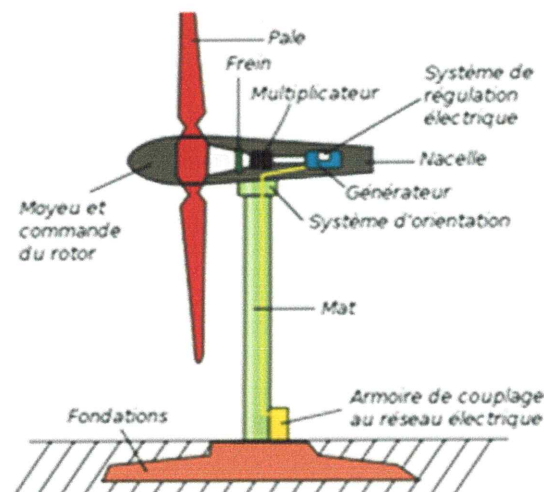


Figure I.7 : Principaux composants d'une éolienne [13].

1- Le rotor : formé de pales (ou ailes) assemblées dans leur moyeu et tournant autour d'un rotor horizontal. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 2 à 3 (rotor tripale).

2- La nacelle: regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique: arbres lents et rapides, roulements, multiplicateur, le frein à disque, frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle

(nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

3- Le mât : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique.

Du point de vue structure, on distingue deux grands types d'éoliennes qui sont:

- Eolienne à axe vertical.
- Eolienne à axe horizontal.

I.3.2.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple: le vent fait tourner des pales qui font-elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne [13].

I.3.3 Générateurs 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 (dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone), figure (I.8). La fréquence de courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse (régulateur de vitesse) sur le moteur diesel [14].

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

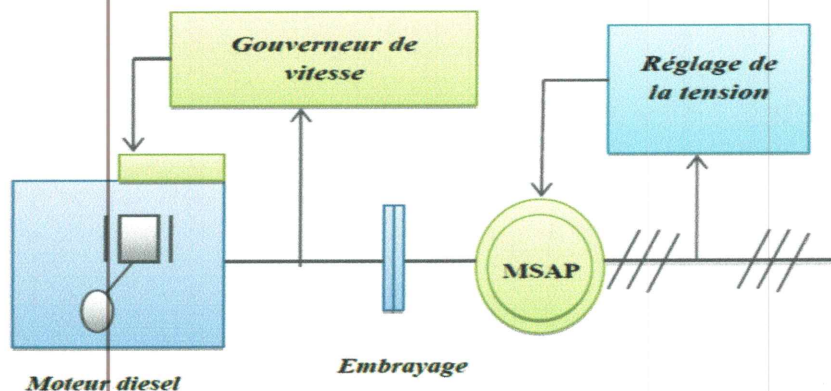


Figure I.8 : Configuration de générateur diesel.

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

I.3.4 Batteries

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les SEHs afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours), il est parfois aussi utilisé avec les SEHs connectés à des grands réseaux isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [15].

Dans la plupart des cas, les batteries représentent la technologie la plus rentable. Elles sont d'habitude de type plomb-acide. Les batteries nickel-cadmium sont rarement utilisées. La technologie des batteries plomb-acide bénéficie en effet d'avantages tels son faible coût par rapport aux autres technologies.

I.3.5 Convertisseurs de puissance

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer la puissance produite par le système et l'adapter aux caractéristiques de la charge électrique. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs:

- **Les redresseurs** : ils réalisent la conversion AC/DC. Dans les systèmes hybrides, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source AC. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement.
- **Les onduleurs** : ils convertissent le courant DC en courant AC. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges AC. ou en parallèle avec des sources AC. les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge.
- **Les hacheurs** : ce type de convertisseurs, permet de réaliser la conversion DC/DC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources.

I.3.6 Système de supervision

Un système de supervision [16], est un onduleur multifonctionnel comprenant principalement comme le montre la figure (I.9):

- Une composante contrôlant le point de fonctionnement du champ PV et maximisant la puissance délivrée;

- Une composante 'onduleur' convertissant le courant continu (provenant du champ photovoltaïque ou des batteries) en courant alternatif, et un 'redresseur' convertissant le courant alternatif en courant continu pour charger les batteries,
- Une composante régulant la charge des batteries afin d'en allonger la durée de vie. Ces différentes fonctions peuvent être partagées entre plusieurs équipements distincts, ou bien être combinées en une seule unité centralisée.

Les composants de l'onduleur multifonctionnel contrôlent l'exploitation des différentes sources d'énergie du système hybride. Un dysfonctionnement de l'un de ces composants entravera considérablement le fonctionnement de l'ensemble du système hybride. Par ailleurs, des réglages inappropriés des divers seuils qui contrôlent le basculement entre sources peuvent affecter la durée de vie des batteries ou le rendement d'utilisation de l'énergie solaire. Le concepteur du système doit donc dimensionner l'onduleur multifonctionnel, et le mode d'exploitation de celui-ci, en recherchant à la fois la qualité, la robustesse, la durabilité et la simplicité d'exploitation.

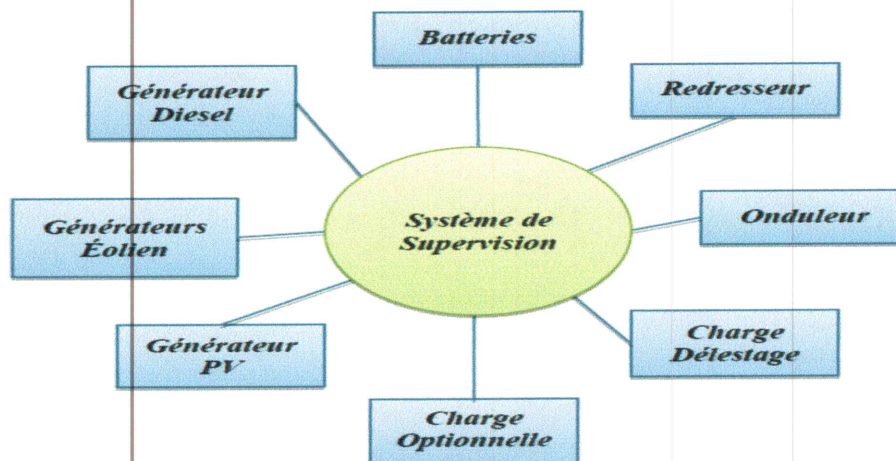


Figure I.9 : Architecture du système de supervision d'un SEH.

I.4 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH

Généralement, les systèmes d'énergie rencontrent plusieurs problèmes qui devraient être résolus:

- 1 - Les variations de l'énergie renouvelables (indépendamment de la charge);
 - 2 - Le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels peut être très élevé;
- L'usure prématurée de générateurs diesels et de leurs démarreurs.

- Le temps nécessaire pour le démarrage et l'arrêt de générateur diesel.
 - La carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.
- 3 - Si l'excès d'énergie dans le réseau ne peut pas être éliminée, la production de l'énergie renouvelable doit alors être limitée, ou nécessite du système de commandes supplémentaire pour maintenir la qualité de la tension, tous ces dispositifs augmentent le coût du capital et conduit à un temps de récupération accrue. La réduction des coûts sera un encouragement à l'industrie de mettre en œuvre de tels systèmes;
- 4- Le cycle de vie des batteries devrait être amélioré grâce à des technologies innovantes.

I.5 Mise en œuvre d'un système d'énergie hybride

Dans ce paragraphe nous allons décrire brièvement les étapes nécessaires à la mise en œuvre d'un SEH, qui sont:

- Choix de l'architecture du système énergétique;
- Dimensionnement optimal du système;
- Choix de la stratégie de fonctionnement.

➤ Étape 1: Choix de l'architecture appropriée

Elle consiste à choisir le type de composants du système d'énergie, ce choix se fait essentiellement par rapport aux ressources énergétiques disponibles sur le site d'implantation (gisement solaire, gisement éolien,..).

➤ Étape 2: Dimensionnement optimal des composants du système

Il consiste à définir la taille des composants du système qui satisfont les contraintes de fonctionnement imposées par le concepteur tout en minimisant les coûts économiques de cycle de vie du système: on parle ici d'optimum technico-économique.

Il existe différentes méthodes de dimensionnement des SEHs dans la littérature comme les méthodes graphiques, analytiques, probabilistes, itératives, à intelligence artificielle, hybrides, et outils logiciels,.....etc.

Egalement différents critères ou fonctions peuvent être optimisés lors de la conception ou du dimensionnement d'un SEH par exemple : coût de cycle de vie du système, coût de revient de l'énergie électrique, LPSP, émissions du CO₂, émissions de GES, SOC,etc.

➤ **Étape 3: Définir une stratégie de gestion d'énergie**

Elle décrit la manière dont les composants du SEH fonctionnent comme un système unique et prend des décisions concernant le type, le moment où les générateurs de puissance doivent fonctionner pour produire la puissance sollicitée par la charge électrique et à quel niveau.

✚ **Types de stratégies de contrôle**

- **Stratégies de commande des sources d'énergie**

Les sources énergétiques ont pour objectifs de produire un maximum de puissance, afin de couvrir la demande moyenne en permanence, et donc d'assurer l'autonomie énergétique, mais aussi de rentabiliser au mieux le coût du système de puissance: des contrôleurs de maximisation de la puissance produite par les sources énergétiques sont utilisés: Maximum Power Point Trackers (MPPT). Chaque source énergétique est considérée séparément du point de vue contrôle.

- **Stratégies de commande des unités de stockage**

Lorsque les unités de stockage sont hybridées, chacune d'elles est associée à un régulateur afin de contrôler la composante de la puissance devant être stockée ou déstockée afin de minimiser les cycles de charge et de décharge et ainsi et allonger la durée de vie des batteries.

- **Stratégies de supervision**

Elles contrôlent l'exploitation des différentes sources et unités de gestion d'énergie du système hybride comme il a été expliqué dans le § I.3.6.

Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art des SEHs a été présenté. Ces systèmes semblent être une bonne alternative qui permet d'intégrer les sources d'énergie renouvelables dans le processus de production d'énergie électrique. Bien que Les SEHs présentent des inconvénients qui peuvent être résumés en une difficulté de conception à l'étape de dimensionnement, d'optimisation et de gestion des flux énergétiques de différentes natures, ces systèmes présentent des meilleures performances que les systèmes qui ne comprennent qu'une source d'énergie unique.

Afin d'obtenir des systèmes fiables, faisables, et écologiques, il y a une tendance actuelle dans le développement de méthodes de dimensionnement multi-objectifs et des outils logiciels; ainsi, il est possible d'assurer l'évaluation, de différents points de vue, de la performance du système.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter les modèles mathématiques des composants d'un système d'énergie hybride.

CHAPITRE II

**Modèles mathématique des composants du
système d'énergie hybride.**

CHAPITRE II

Modèles mathématiques des composants du système d'énergie hybride.

Introduction

La modélisation est une étape importante, avant toute phase de dimensionnement optimal nécessaire à la détermination des caractéristiques optimales d'un système énergétique que ce soit hybride ou utilisant une seule source énergétique.

Dans le présent chapitre nous allons présenter les modèles mathématiques de quatre générateurs énergétiques qu'intègrent les SEHs qui seront étudiés dans le **Chapitre IV** à savoir le générateur PV, le générateur éolien, le générateur diesel, et le système de stockage (batteries) qui servent à emmagasiner l'excès énergétique lorsqu'il existe et de le restituer lors des périodes de manque d'apport.

II.1 Système photovoltaïque

Un système PV est un ensemble de modules PV connectés en série et en parallèle pour fournir la puissance suffisante adaptée aux caractéristiques de la charge électrique.

Par définition, un module photovoltaïque consiste en un certain nombre de cellules solaires toutes assemblées avec des connexions et des éléments de protection, etc. La protection du système PV n'est pas prise en considération dans le cadre de ce mémoire; l'accent est mis uniquement sur la cellule / module / champ.

II.1.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

II.1.1.1 Modélisation électrique d'une cellule PV

Une cellule PV est une diode de grandes dimensions avec des caractéristiques de fabrication bien particulières, son illumination provoque la génération d'un photo-courant I_{ph} . Plusieurs modèles de cellules PV existent dans la littérature dont les plus utilisés sont le

modèle à une simple diode et le modèle à deux diodes [17,18]. Dans notre étude nous allons considérer le modèle à une seule diode.

Une partie du courant I_{ph} est redissipée dans la jonction selon l'équation simplifiée de la diode ce qui conduit au modèle simplifié de la cellule PV qui est équivalente à une source de courant shuntée avec une diode figure (II.1).

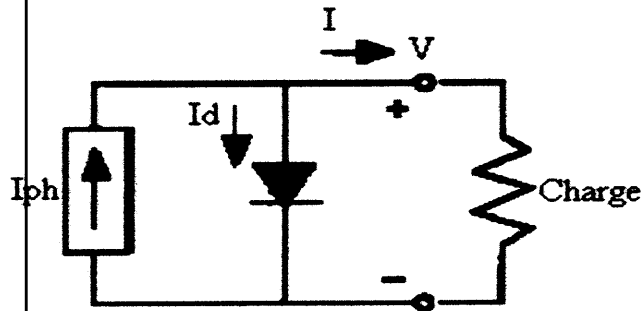


Figure II.1 : Circuit électrique simple de la cellule PV.

Le courant de sortie I est obtenu à partir du circuit équivalent de la figure (II.1):

$$I = I_{ph} - I_d \quad (II.1)$$

Où :

- I_{ph} : le courant photogénéré.
- I_d : le courant de la diode, il suit la loi exponentielle suivante :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (II.2)$$

Tels que:

- V : la tension aux bornes de la diode (Volt) ;
- n : le Coefficient d'idéalité de la diode $1 \leq n \leq 2$;
- I_s : le courant de saturation inverse de la diode (A) ;
- V_T : le potentiel thermodynamique. Tel que

$$V_T = \frac{K \cdot T}{q}$$

Avec:

- K : la constante de Boltzmann: $K=1,38 \cdot 10^{-23} \text{J}/^\circ\text{K}$.
- T : la température absolue en Kelvin.

- q : la charge de l'électron $q=1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$.

En remplaçant I_d par sa formule de l'Equation (II.2) dans l'Equation (II.1) on obtient la relation courant-tension de la cellule PV:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{V_T} \cdot n\right) - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

La représentation précédente de la cellule PV est idéale ce qui n'est pas le cas en réalité. Afin de prendre en compte les différents phénomènes physiques présents au niveau de la cellule PV, le modèle électrique précédent est complété par deux résistances série (R_s) et parallèle (R_p) comme montré sur la figure (II.2).

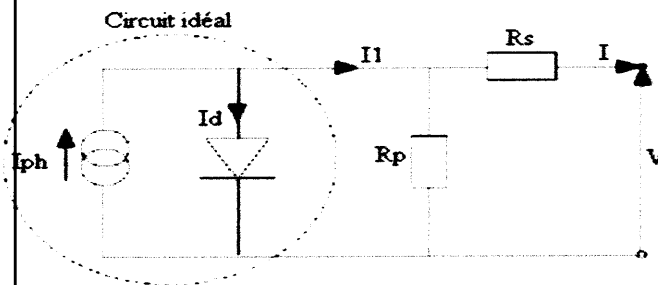


Figure II.2 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV.

- La résistance R_s est due à la résistivité des différentes couches de la cellule PV : émetteur, base et contacts métalliques [en particulier leurs interfaces avec le semi-conducteur] [18].

- La résistance parallèle R_p (résistance shunt) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction [18].

L'équation de la caractéristique I-V devient alors:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (\text{II.4})$$

II.1.1.2 Caractéristiques électriques d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque est définie par sa courbe caractéristique électrique (courant-tension). Elle indique la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert figure(II.4) [7].

Les caractéristiques électriques de la cellule peuvent être déterminées soit à partir des courbes I-V ou de l'équation caractéristique (II.5). Ces caractéristiques sont les suivantes:

- **Courant de court-circuit [19]**

Si l'on place une photopile en court-circuit, elle va générer un courant maximal à tension nulle, ce courant est appelé courant de court-circuit I_{CC} . En annulant la tension dans l'Equation (II.4) on obtient:

$$I_{CC} = I_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{I_{CC} * R_S}{n * V_T}\right) - 1 \right] - \frac{I_{CC} * R_S}{R_p} \quad (II.5)$$

Si on néglige le terme $I_S \left[\exp\left(\frac{I_{CC} * R_S}{n * V_T}\right) - 1 \right]$ devant I_{ph} [résistance série faible] on obtient

l'expression approchée du courant de court-circuit:

$$I_{CC} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_S}{R_p}} \quad (II.6)$$

Puisque $R_S \ll R_p$ on peut mettre $I_{CC} = I_{ph}$

Pour le silicium le courant de court-circuit $I_{CC} = 30$ (mA/cm²) pour un éclairement maximal.

- **Tension en circuit-ouvert**

C'est la tension V_{CO} pour laquelle le courant débité par la cellule PV est nul. La tension en circuit-ouvert est obtenue à partir de la relation (II.7):

$$0 = I_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{V_{CO}}{n * V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{CO}}{R_p} \quad (II.7)$$

En négligeant l'effet de la résistance parallèle dans l'équation (I.8), la tension en circuit ouvert est donnée par la relation (II.8):

$$V_{CO} = n * V_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1\right) \quad (II.8)$$

On remarque que cette tension varie avec le $\log(I_{ph})$ donc avec le \log de l'illumination. En revanche elle décroît avec la température malgré le terme (KT/q) car le courant de saturation inverse de la diode I_S varie avec la température et double environ tous les 10°K.

• Puissance optimale

Dans les deux cas précédents; en court-circuit et en circuit ouvert aucune puissance n'est extraite du panneau PV. La meilleure combinaison est appelée point de puissance maximale (PPM). A cette puissance maximale correspond une tension maximale V_M et un courant maximal I_M telle que $P_M = I_M * V_M$.

Une convention internationale définit la puissance d'une cellule PV en Watt Crête (W_C). Le watt crête est la puissance optimale fournie par la photopile dans les conditions de mesures normalisées.

• Facteur de forme (FF)

Ce paramètre reflète la qualité de la cellule par rapport à une cellule idéale ($FF=1$). Il montre la déviation de la courbe I-V par rapport à un rectangle de longueur V_{CO} et de largeur I_{CC} qui correspond à la photopile idéale: $P_{\max \text{ idéale}} = V_{CO} * I_{CC}$ figure (II.3). Il correspond au rapport de la puissance maximale sur le produit V_{CO} et I_{CC} .

$$FF = \frac{V_M * I_M}{V_{CO} * I_{CC}} \quad (II.9)$$

Les valeurs typiques du facteur de forme vont de 60% pour les cellules amorphes à 80% pour les meilleures cellules.

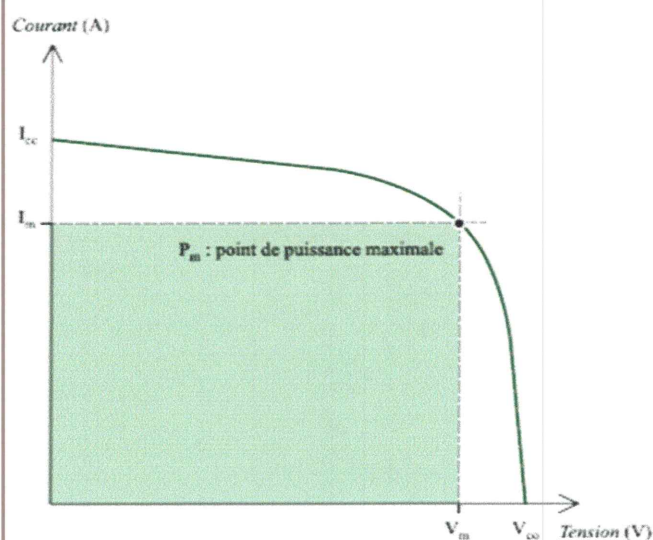


Figure II.3 : Courbe électrique courant-tension spécifique à chaque type de cellule.

II.1.2 Module photovoltaïque [20,6]

Une cellule élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 W avec une tension de moins de 1 volt et un point de puissance maximale à environ 0.45 volt pour une cellule au silicium cristallin [ex: une cellule au silicium de 10Cm^2 produit une puissance de l'ordre de 1.25W]. Donc une cellule PV ne suffit pas pour constituer à elle seule un générateur PV. Afin d'obtenir une tension compatible au matériel électrique usuel, les cellules PV sont regroupées dans des structures appelées modules PV. La connexion des cellules en série permet d'augmenter la tension pour un même courant tandis que leur assemblage en parallèle permet d'obtenir des intensités du courant élevées pour la même tension figure (II.4).

Les premiers modules PV ont été conçus pour pouvoir charger des batteries de 12 volts. C'est pour cette raison que la plupart des panneaux PV comportent le nombre arrondi de 36 cellules connectées en série (en 4 rangés de 9).

Des modules constitués de 72 cellules en série existent aussi sur le marché, ils sont conçus pour charger des batteries de 24 volts.

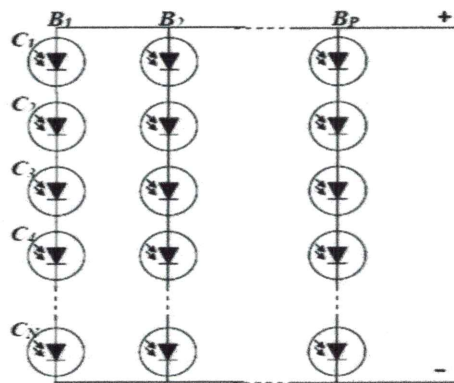


Figure II.4 : Module PV constitué de NP branches parallèles avec NS cellules séries.

Un module PV remplit trois fonctions principales qui sont:

- Protection des cellules PV et de leur contacts métalliques contre les conditions ambiantes en particulier l'humidité.
- Obtention d'une tension utilisable grâce à la connexion de plusieurs cellules en série.
- Protection mécanique des cellules PV qui sont très fragiles.

Pour fabriquer des modules PV avec des cellules mono ou poly-cristallines, on utilise la même technologie; la seule différence est en général un nombre plus élevé de cellules PV pour les polycristallines. Cela est dû au fait que la tension des cellules au point de puissance maximale est plus faible que celle des cellules monocristallines.

II.1.2.1 Champ photovoltaïque [21]

Lorsqu'on a besoin de plus de puissance on connecte des modules PV en série et en parallèle formant ce qu'on appelle un champ PV. La mise en série des modules permet d'augmenter la tension tandis que la mise en parallèle permet d'augmenter le courant qui est égal à la somme des intensités de chaque branche du champ PV.

Pour déterminer le nombre de modules PV à connecter en série pour obtenir la tension désirée il faut connaître la tension nominale nécessaire et la tension de fonctionnement des modules.

Dans le cas des systèmes autonomes chargeant des batteries, la tension nominale est le plus souvent un multiple de 12 volts, tension de charge prévue pour les modules ayant 33 à 40 cellules. Le choix dans ce cas dépend de la température ambiante du site qui détermine le choix du module, les panneaux à grands nombres de cellules pour les pays chauds, à nombre de cellules plus faible pour les pays tempérés. Ensuite on connecte en série le même nombre de panneaux que de batteries 12 volts en série.

Le nombre de modules en parallèle sera fonction de la puissance maximale d'un panneau à la température dite NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) et pour les panneaux standard, elle varie entre 45 et 50°C.

II.1.2.2 Modélisation du module PV [13,16]

Bien que plusieurs modèles électriques existent, nous allons utiliser un modèle électrique simple figure (II.5) n'exploitant que les données du module PV fournies par le fabricant. Ce modèle consiste en une source de courant shuntée avec une diode (D) d'un facteur d'idéalité (n) et une résistance série (R_s). Dans le modèle de la figure (II.2), l'effet de la résistance parallèle a été négligé ($R_p \gg$).

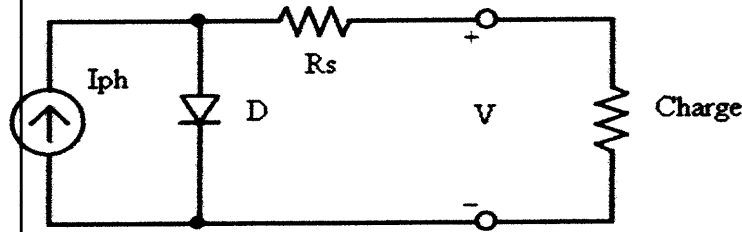


Figure II.5 : Circuit équivalent d'une cellule PV.

Les équations que supporte notre modèle sont les suivantes:

➤ Equation 1: en annulant l'effet de la résistance parallèle dans l'Equation (II.5) c-à-d ($R_p = \infty$), on obtient l'Equation (II.10) qui décrit la nouvelle relation courant-tension de la cellule PV:

$$I = I_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{V + IR_S}{n * V_T}\right) - 1 \right] \quad (II.10)$$

D'après l'Equation (II.6): $I_{ph} = I_{cc}$ donc

$$I = I_{cc} - I_S \left[\exp\left(\frac{V + IR_S}{n * V_T}\right) - 1 \right] \quad (II.11)$$

Pour plus de précision, l'effet de la température sur le courant de court-circuit I_{cc} et le courant de saturation de la diode I_S a été inclus.

➤ Equation 2: elle décrit l'influence de la température sur le courant de court-circuit (I_{cc}) qui est donné par l'Equation (II.12):

$$I_{cc}(T) = I_{cc}(T_{ref}) \left[1 + \alpha(T - T_{ref}) \right] \quad (II.12)$$

Telles que:

- T : la température de fonctionnement.
- T_{ref} : la Température de référence de la cellule PV en (K): $T_{ref} = 298^{\circ}K = 25^{\circ}C$.

D'après l'Equation (II.13) on remarque que la relation Courant de court-circuit-Température est linéaire, le coefficient de linéarité (α) représente le changement du courant de court-circuit par degré Celsius.

➤ Equation 3: Le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'irradiation $G(\text{w.m}^{-2})$. La relation courant de court-circuit-Irradiation est donnée par la formule (II.13).

$$I_{cc}(G) = \frac{G}{G_0} I_{cc}(G_0) \quad (\text{II.13})$$

G_0 : Valeur nominale de l'irradiation: $G_0 = 1KW / m^2$.

➤ Equation 4: elle décrit la relation entre le courant de saturation de la diode I_S et la température T .

$$I_S(T) = I_S(T_{ref}) \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/n} \exp \left(\frac{-qE_g}{nK \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \right) \quad (\text{II.14})$$

Sachant que le courant de saturation inverse de la diode est donné par la relation:

$$I_S = \frac{I_{CC}}{\exp\left(\frac{qV_{CO}}{nKT}\right) - 1} \quad (\text{II.15})$$

➤ Equation 5: La résistance série R_S du module PV influe directement sur la pente de la caractéristique I-V dans la région proche de la tension en circuit ouvert (V_{CO}). Comme montré sur la figure (II.6). L'équation de la résistance série R_S est déterminée en différenciant l'équation (III.12) et en réarrangeant les termes en R_S :

$$I = I_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{V + IR_S}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.16})$$

$$dI = 0 - I_S \left(\frac{dV + dIR_S}{nV_T} \right) \exp\left(\frac{V + IR_S}{nV_T}\right) \quad (\text{II.17})$$

$$R_S = \frac{-dV}{dI} - \frac{nV_T}{I_S \exp\left(\frac{V + IR_S}{nV_T}\right)} \quad (\text{II.18})$$

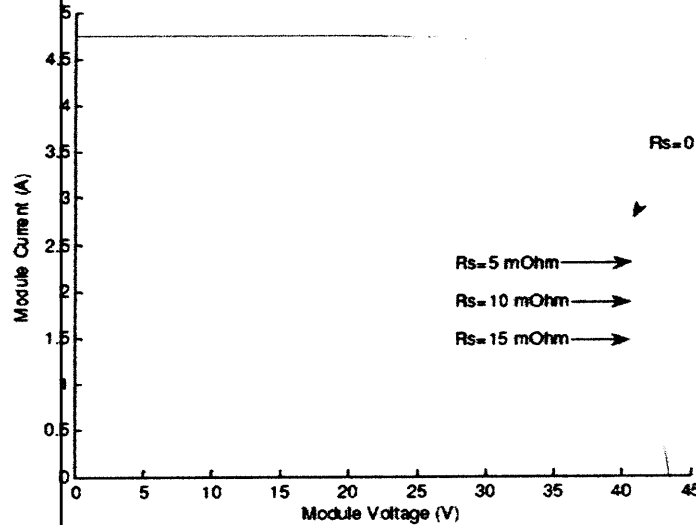


Figure II.6 : Effet de la résistance série (1KW/m², 25°C).

La résistance série R_s influe largement sur la pente de la courbe caractéristique I-V au voisinage de V_{CO} . Elle peut être calculée par la formule suivante:

$$R_s = \frac{-dV}{dI} \Big|_{V_{CO}} - \frac{nV_T}{I_s \exp\left(\frac{V_{CO} + IR_s}{nV_T}\right)} \tag{II.19}$$

- $\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{CO}}$: représente la pente de la courbe I-V calculée dans la région proche de V_{CO} en utilisant les courbes publiées par le fabricant dans la fiche technique puis on la divise par le nombre de cellules mises en série N_s .
- V_{CO} : la tension en circuit ouvert de la cellule PV, calculée en divisant la tension en circuit ouvert du module PV par le nombre de cellules connectées en série.

Enfin, pour résoudre l'équation de la caractéristique non linéaire, on utilise la méthode de Newton décrite par la relation (II.20):

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \tag{II.20}$$

Où:

- $f'(x_n)$: La dérivé de la fonction $f(x_n)$
- x_n : La présente itération.
- x_{n+1} : L'itération suivante.

Ainsi, on réécrit l'équation (II.1) sous la forme suivante:

$$f(I) = I_{ph} - I - I_S \left[\exp\left(\frac{V + IR_S}{nV_T}\right) - 1 \right] = 0 \tag{II.21}$$

En remplaçant dans l'Equation (III.21), on peut ainsi calculer le courant I par itérations

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_n - I_S \left[\exp\left(\frac{V + I_n R_S}{nV_T}\right) - 1 \right]}{-1 - I_S \left(\frac{R_S}{nV_T}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{V + I_n R_S}{nV_T}\right) \right]} \tag{II.22}$$

La caractéristique I-V est représentée sur la figure (II.7).

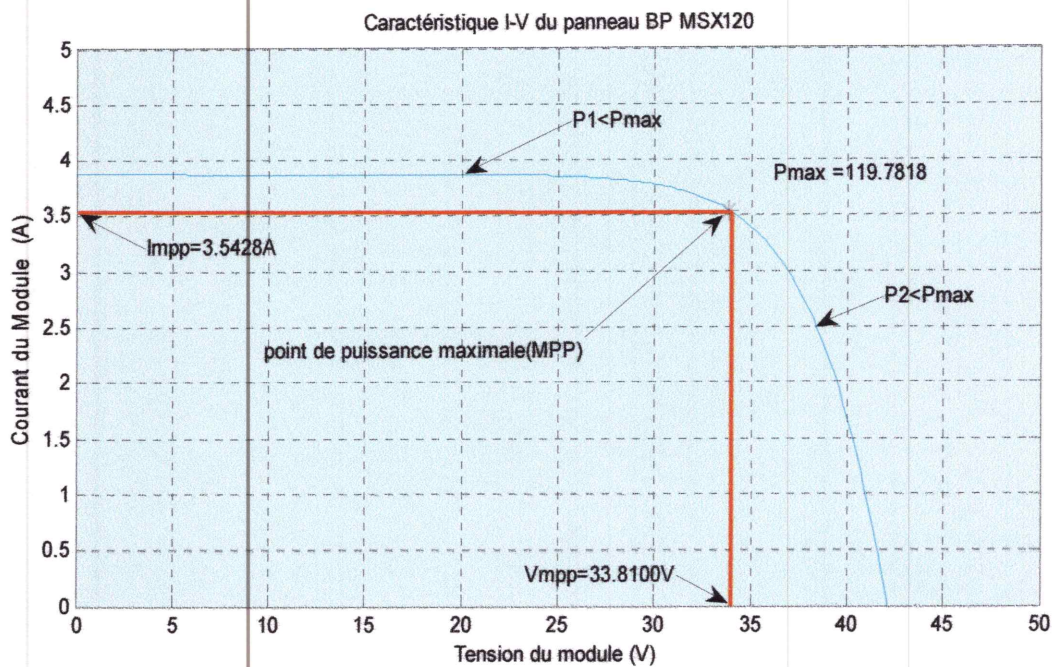


Figure II.7 : Caractéristique I-V du module PV BP MSX120 (G=1KW, T=25°C).

Les caractéristiques des cellules solaires peuvent être affectées par la variation de la température et de l'irradiation.

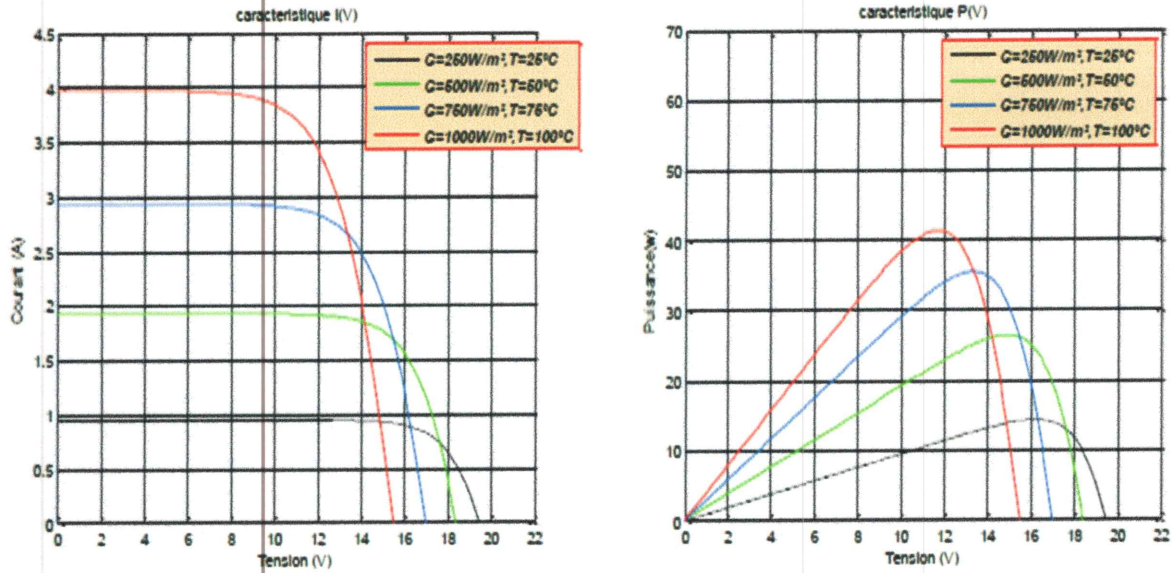


Figure II.8 : Effet de la variation de la température et de l'irradiation sur le courant et la puissance de sortie du module PV.

D'après la figure (II.8), on remarque que le courant de court-circuit est largement affecté par la variation de température que par l'irradiation solaire. On peut également noter que la puissance délivrée par un module photovoltaïque dépend beaucoup plus de la variation de l'éclairement que de la variation de la température.

II.2 Modélisation du générateur éolien

L'énergie cinétique d'une masse d'air m qui se déplace avec la vitesse V , est:

$$Ec = \frac{1}{2} mV^2 \quad (\text{II-23})$$

II.2.1 Puissance énergétique disponible

L'énergie cinétique moyenne, disponible sur un site donné, par unité de temps et par unité de surface, due à la vitesse du vent, s'écrit :

$$p = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (\text{II-24})$$

Avec:

- A : la surface traversée par le vent (m^2);
- ρ : la densité de l'air ($= 1.225 \text{kg/m}^3$);
- V : la vitesse du vent (m/s).

• Potentiel énergétique éolien (Théorème de Betz)

L'énergie cinétique disponible est convertie en énergie mécanique en utilisant une machine à aubes (ou pales) dite communément éolienne. La vitesse du vent en aval de la roue n'étant jamais nulle, ceci implique que la puissance éolienne disponible n'est pas entièrement récupérée au niveau de l'hélice [22].

Limite de Betz : c'est la puissance maximale récupérable est 59 % de la puissance de vent. appelé aussi coefficient C_p qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

C_p : La ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible.

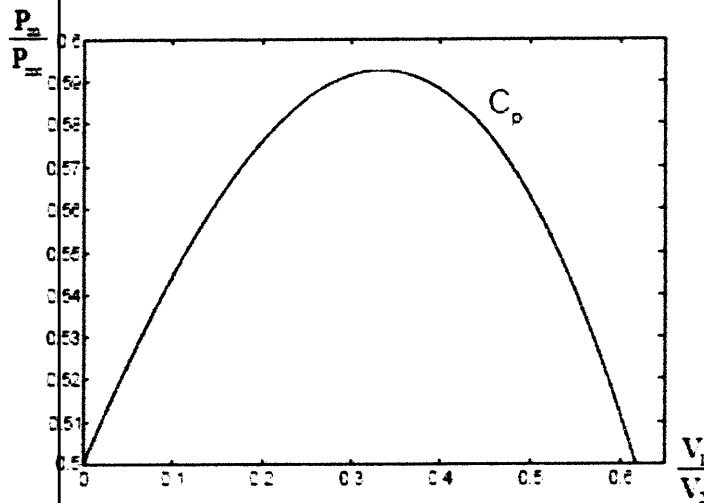


Figure II.9 : Coefficient de puissance.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (\text{II-25})$$

– Ω : Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne

• Distribution de Wei bull

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Wei bull Sa densité de probabilité se présente sous la forme [22]:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (\text{II-26})$$

K et C sont les paramètres de Weibull.

Avec

- K : facteur de forme.
- C : facteur d'échelle.

• Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme k est égal à 2. Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(v) = 2 \left(\frac{v}{c}\right) \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right) \quad (\text{II-27})$$

II.2.2 Puissance éolienne moyenne utilisable

Etant donné que la vitesse du vent est variable et que chaque machine éolienne est caractérisée par la vitesse de démarrage V_d , une vitesse nominale V_n et une vitesse d'arrêt V_s spécifiques, la puissance éolienne utilisable est donnée par:

$$p_u = \frac{1}{2} \rho A V_u^3 \quad (\text{II-28})$$

La vitesse V_u est déduite de la courbe représentative de la distribution de Weibull entre les limites de la machine [22]. La limite inférieure est représentée par la vitesse de démarrage.

En second lieu, lorsque la vitesse nominale V_n est atteinte, l'augmentation de la vitesse de vent n'a aucun effet sur le régime de la roue. Enfin, lorsque la vitesse d'arrêt V_s est atteinte, le système est stoppé.

La densité de puissance utilisable est donnée par :

$$p_u = \begin{cases} 0 & \text{pour } V < V_d \\ \frac{1}{2} \rho A V^3 & \text{pour } V_d < V < V_n \\ \frac{1}{2} \rho A V^3 & \text{pour } V_n < V < V_M \\ 0 & \text{pour } V \geq V_M \end{cases} \quad (\text{II-29})$$

Avec:

- V_d : la vitesse d'amorçage de l'éolienne ;
- V_n : la vitesse nominale ;
- V_m : la vitesse d'arrêt.

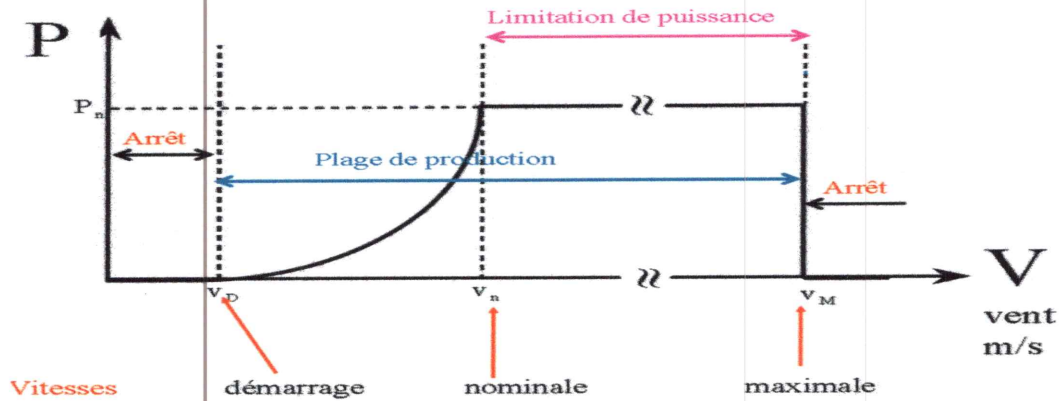


Figure II.10 : Courbe de puissance d'une éolienne.

II.3 Modélisation du générateur diesel

II.3.1 Description du cycle du moteur diesel

Le moteur Diesel fonctionne selon un cycle à 4 temps : admission, compression, détente, échappement. Un cycle correspond à une combustion dans chaque chambre du moteur, deux aller-retour du piston et deux tours de vilebrequin, soit 720° d'angle vilebrequin ($^\circ AV$). Nous allons d'écrire ce cycle avec une approche mécanique et thermodynamique. L'approche thermodynamique, elle s'appuiera sur le diagramme de Clapeyron théorique, figure (II-11) qui décrit l'état des gaz contenus dans la chambre de combustion, en fonction de leur volume (abscisse v_{cyl}) et de leur pression (ordonnée p_{cyl})

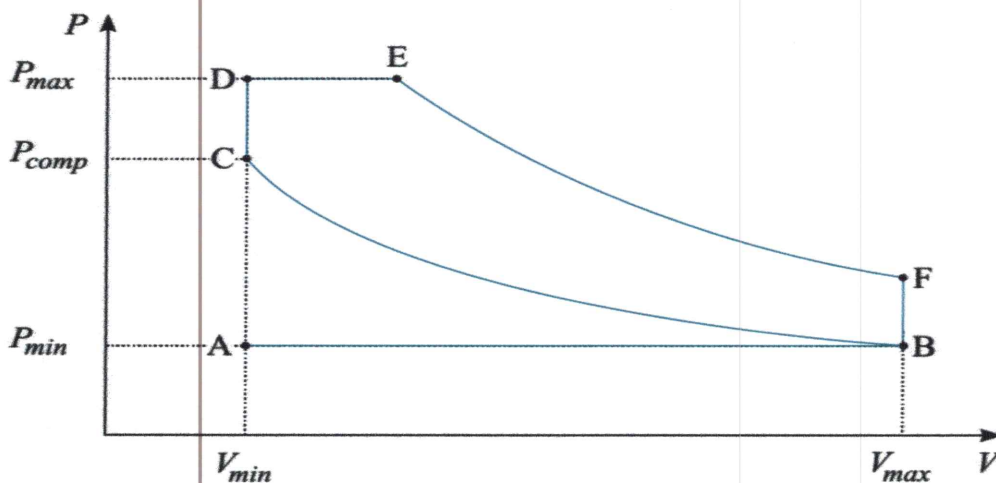


Figure II.11 : Diagramme de Clapeyron théorique du cycle d'un moteur à 4 temps.

II.3.2 Taux de consommation de carburant

Il indique la quantité de carburant nécessaire pour générer une certaine quantité d'énergie électrique. Le taux de consommation (F) du groupe électrogène est donné par la relation suivant :

$$F = a (p_g)^2 + b p_g + c \quad (\text{II-30})$$

Avec :

P_g : La puissance du groupe électrogène.

a , b et c fourni par le fabricant du groupe électrogène diesel dans un tableau ou dans la fiche technique dans certains pourcentages (25%, 50%, 75% et 100%) de sa puissance nominale.

II.3.3 Cylindrée unitaire

C'est le volume v défini entre le point mort haut (PMH) et le point mort bas (PMB) dans un cylindre. Le diamètre du cylindre nommé alésage. La distance entre le PMH et le PMB est la course C .

$$v = \frac{\pi A^2}{4} * C \quad (\text{II-31})$$

• Cylindrée du moteur v_t

Lorsque il y a plusieurs cylindres, la cylindrée du moteur est le produit de la cylindrée unitaire par le nombre de cylindres n .

$$v_t = v * n \quad (\text{II-32})$$

• Taux de compression volumétrique

Le rapport entre le volume total de cylindre sur le volume de chambre de combustion

$$\varepsilon = \frac{v + v_m}{v_m} \quad (\text{II-33})$$

Avec

v_m : Volume de chambre de combustion

II.3.4 la puissance

- **La puissance effective du moteur** : est donnée par la relation

$$p = w_{\text{cycle}} * n_{\text{cycle}/s} \quad (\text{II-34})$$

Avec :

$n_{\text{cycle}/s}$: Le nombre de cycle par seconde.

$w_{\text{cycle}} = p_{\text{me}} \cdot v$: est le travail par cycle.

p_{me} : Pression moyenne effective.

v : la cylindrée.

• La puissance d'un moteur

$$p = c * \Omega \quad (\text{II-35})$$

où P : la puissance du moteur en W.

C : le couple en N.m.

Ω : vitesse angulaire du moteur en tr/min.

$$\Omega = \frac{\pi \cdot N}{30}$$

N : fréquence de rotation du moteur en tr/min.

II.3.5 Le rendement

II.3.5.1 Le rendement thermique η

Défini comme étant le travail fourni divisé par la chaleur absorbée.

$$\eta = \frac{w}{|Q_c|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} \quad (\text{II-36})$$

II.3.5.2 Le rendement volumétrique

$$\eta_v = \frac{Q_{\text{ma}} \text{ réelle}}{Q_{\text{ma}} \text{ théorique}} \quad (\text{II-37})$$

Avec

$Q_{\text{ma}} \text{ réelle}$: Consommation massique d'air réelle du moteur en Kg /s.

$Q_{\text{ma}} \text{ théorique}$: Consommation massique d'air théorique du moteur en Kg/s.

$$Q_{\text{ma}} \text{ théorique} = \frac{N}{120} V \rho$$

Avec

N : vitesse de rotation du moteur tr/min ;

V : cylindrée du moteur en m^3 ;

ρ : masse volumique de l'air en Kg/m^3 .

II.3.5.3 Le rendement mécanique

$$\eta_m = \frac{p_u}{p_i} \quad (\text{II-38})$$

Avec

p_u : Puissance utile;

p_i : Puissance indiquée.

II.4 Modélisation des batteries

Le modèle des accumulateurs électrochimique est basé sur le schéma électrique de la figure (II.12), la batterie est alors décrite seulement par deux éléments : une source de tension et sa résistance interne.

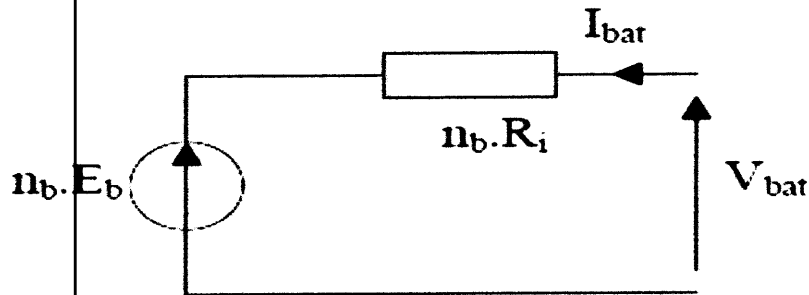


Figure II.12 : Schéma électrique équivalent de n_b élément de batteries en série.

Pour n_b cellules en série, nous pouvons écrire l'équation:

$$v_{bat} = n_b * v_{co}(t) + n_b * R_{bat}(t) * I_{bat}(t) \quad (II-39)$$

Avec

v_{bat} : La tension de la batterie en Volt.

$v_{co}(t)$: La tension de circuit ouvert au temps t en Volt.

$R_{bat}(t)$: La résistance interne de la batterie en Ohms.

$I_{bat}(t)$: Le courant de la batterie en Ampère.

Le modèle de la capacité est établie à partir de l'expression du courant I_{10} , correspondant au régime de fonctionnement C_{10} , dans lequel ΔT est l'échauffement de l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante qui est égale à 25 °C.

$$C = c_{10} \frac{1.67}{1 + 0.67 \left[\frac{\bar{I}}{I_{10}} \right]^{0.69}} (1 + 0.05 * \Delta T) \quad (II-40)$$

La capacité C sert de référence pour déterminer l'état de charge de la batterie 'EDC'. Ce dernier sera formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie.

$$EDC = 1 - \frac{Q}{C} \quad (II-41)$$

Avec :

$Q = I * t$: la quantité de charge manquante à la batterie.

- t : la durée de charge ou décharge par la batterie.

II.4.1 Les principales caractéristiques d'une batterie

II.4.1.1 La charge

Si la charge de la batterie va s'effectuer grâce au panneau solaire photovoltaïque. Au fur et à mesure de la journée, la tension de la batterie va augmenter jusqu'à un seuil d'environ 14V (pour une batterie de 12V). Au-delà de cette limite, le régulateur va couper la liaison électrique avec le panneau afin d'éviter les problèmes de surtensions. A l'inverse, ce même régulateur coupe automatiquement l'alimentation électrique avec le récepteur lorsque la tension de la batterie est trop faible (environ 11V pour une batterie de 12V) [24].

L'équation de la tension en charge fait apparaître l'influence de la force électromotrice et celle de la résistance interne:

$$v_c = nb\{2 + 0.16 * EDC\} + nb * \frac{I}{c_{10}} \left[\frac{6}{1+|I|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right] (1 - 0.025 * \Delta T)$$

(II-42)

II.4.1.2 : La décharge

La décharge de la batterie vers le récepteur (des lampes par exemple) est beaucoup plus importante à définir. En effet, la durée de vie des accumulateurs dépend principalement de la Profondeur de décharge de la batterie, c'est-à-dire combien d'ampère va-t-on tirer avant de devoir la recharger. Il existe donc une décharge maximale à ne pas dépasser faute de quoi la batterie sera sérieusement détériorée.

L'équation de la décharge permet de donner une structure liée des éléments internes de la batterie en fonction de la force électromotrice, de la résistance interne :

$$V_d = nb\{2.085 - 0.12(1 - EDC)\} - nb * \frac{|I|}{c_{10}} \left[\frac{4}{1+|I|^{1.3}} + \frac{0.27}{(EDC)^{1.5}} + 0.02 \right] * (1 - 0.007 * \Delta T)$$

(II-43)

La figure (II.13) représente l'évolution de la tension de la batterie pendant la charge et la décharge.

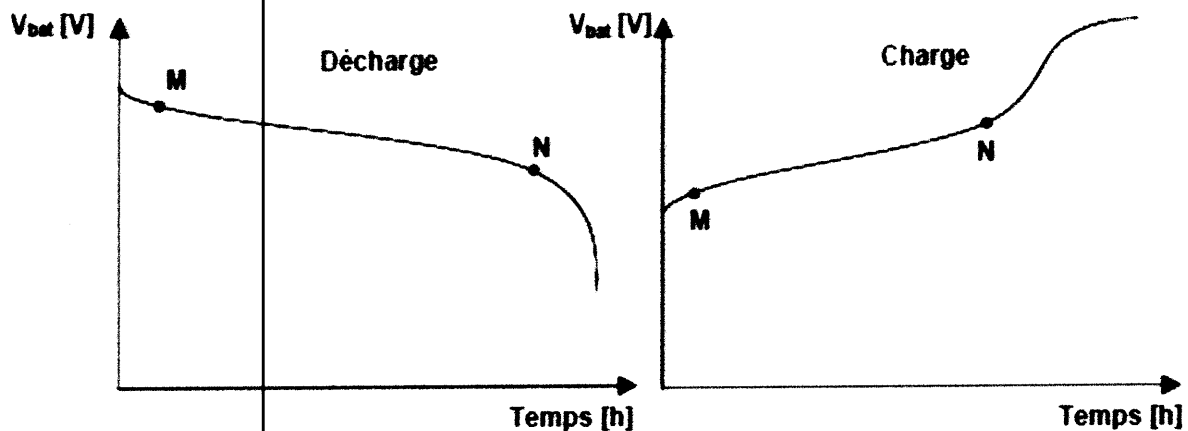


Figure II.13 : Evolution de la tension de la batterie durant la charge et la décharge [25].

II.4.1.3 La durée de vie

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

II.4.1.4 Le rendement

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur, il est exprimé par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{P_{\text{fourni}}}{P_{\text{incident}}} \quad (\text{II-44})$$

Conclusion

La modélisation de chaque composant du système hybride est une étape essentielle car elle permet d'introduire le modèle de chaque sous-système puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constituants. Cette modélisation a été élaborée à partir des modèles de la littérature (champ PV, éolienne, générateur diesel, batteries de stockage)

Le modèle de chaque élément permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

CHAPITRE III

**Outils logiciels pour les systèmes d'énergie
renouvelables hybrides.**

Chapitre III

Outils logiciels pour les systèmes d'énergie renouvelables hybrides.

Introduction

La présence de plusieurs sources énergétiques dans un SEH rend sa conception Complexe. Pour cela, les aspects techniques, énergétiques, économiques et environnementaux doivent être analysés en profondeur pour une utilisation efficace des ressources énergétiques renouvelables. Cela nécessite des outils logiciels et des modèles pour le dimensionnement, l'analyse, la simulation, et l'optimisation. A cette fin, un nombre important de logiciels a été proposé dans la littérature, destinés principalement à faciliter la tâche de conception des systèmes hybrides et à maximiser l'utilisation des ERs en étudiant et en évaluant les différents aspects technologies renouvelables.

III.1 Classification des outils logiciels

Les logiciels d'étude des SEHs ont été classifiés par [26] en quatre catégories:

- Logiciels d'étude de préfaisabilité;
- Logiciels de dimensionnement;
- Logiciels de simulation, d'analyse et d'optimisation;
- Logiciels de simulation à architecture ouverte.

Afin de faciliter le choix du logiciel approprié pour l'étude et la conception optimale du système d'ERs, une compréhension globale des outils logiciels d'étude des SEHs est essentielle.

III.1.1 Logiciels de préfaisabilité

Ce type de logiciels permet de faire une analyse profonde des éléments du projet et fournit des renseignements à propos des caractéristiques physiques, de la viabilité financière, des impacts sociaux, environnementaux ou autres impacts du projet. Ainsi, le

promoteur peut prendre une décision claire quant à la poursuite du projet. L'analyse de faisabilité est caractérisée par la collecte de données précises à propos du site, de la ressource, des coûts et des équipements pour déterminer si le projet proposé a ou non une bonne chance de satisfaire les exigences du promoteur en termes de rentabilité et de rentabilité.

III.1.2 Logiciels de dimensionnement

Ce sont des outils qui effectuent le dimensionnement des systèmes énergétiques: selon les exigences de la charge électrique demandées, ils déterminent la taille optimale de chacun des composants du système.

Les fonctions objectives d'optimisation varient d'un outil à un autre. Certains de ces outils tentent implicitement à minimiser le coût du cycle de vie du système, tandis que d'autres dimensionnent le système d'énergie selon les règles qui conduisent à son fonctionnement correcte.

La plupart des outils de dimensionnement fournissent des informations détaillées sur les flux d'énergie entre les composants et des indicateurs sur les moments critiques de l'année.

III.1.3 Logiciels de simulation

Avec les outils de simulation, par opposition aux outils de dimensionnement, l'utilisateur doit préciser la nature et la taille de chaque composant. L'outil fournit donc une analyse détaillée du comportement du système; la résolution temporelle (longueur du pas de simulation) varie d'un logiciel à l'autre et dépend du niveau de détails requis et de la disponibilité des données d'entrée (par exemple les données météorologiques). Les simulations horaires, qui sont communes, peuvent être utilisées pour le dimensionnement du système, étudier l'impact des changements futurs de la charge, analyser les performances du système dans les cas des conditions de fonctionnement atypiques, l'étude de la sensibilité de la conception envers différents paramètres et l'analyse de l'impact des pannes ou de la détérioration des composants sur le système. Les simulations peuvent également fournir des informations sur les caractéristiques financières et environnementales du système, tels que le coût de cycle de vie, le coût de revient d'énergie et les émissions CO₂. Les outils de simulation peuvent, également, être utilisés pour le dimensionnement. Cela nécessite que l'utilisateur identifie correctement les variables clés et ensuite exécute les simulations à plusieurs reprises, en ajoutant les variables manuellement pour converger au dimensionnement optimal.

III.1.4 Logiciels de recherche à architecture ouverte

Effectuant la recherche et le développement, au niveau des composants et des systèmes, nécessite un haut niveau de flexibilité dans l'utilisation des composants. Bien que les outils de simulation traditionnels puissent effectuer une analyse de sensibilité, ils ne permettent généralement pas à l'utilisateur de modifier les algorithmes qui déterminent le comportement et les interactions des composants individuels. Pour cela une architecture ouverte est nécessaire, le logiciel se compose d'une sélection de routines décrivant les composants et la plate forme pour relier ces routines ensemble. L'utilisateur est libre de modifier les routines ou d'ajouter des routines entièrement nouvelles. Ces outils de recherche peuvent être implémentés soit dans un environnement de simulation d'usage général, ou bien programmés et compilés dans un langage de programmation tels que fortran, C ou pascal. La flexibilité et la puissance des logiciels à architecture ouverte en font des outils de choix des organismes de recherche.

Dans cette section nous allons décrire les outils logiciels pratiques utiles pour la conception et la mise en œuvre des systèmes de production d'électricité autonomes ou connectés au réseau électrique.

III.2 Outils logiciels pour les systèmes d'énergie hybrides

III .2.1 RETScreen [27-28]

Le logiciel RETScreen International est un outil développé par le ministère des ressources naturelles au Canada, il est destiné à l'étude de faisabilité et d'analyse de projets utilisant des technologies d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables (TERs). Le logiciel RETScreen permet au concepteur du projet l'évaluation de la production d'énergie, l'évaluation des coûts de cycle de vie; l'évaluation des réductions des émissions des gaz à effet de serre, l'établissement du sommaire financier et l'évaluation des risques qui peuvent résulter de l'utilisation des technologies à énergies renouvelables ainsi que l'analyse de sensibilité.

Le logiciel est disponible en plusieurs langues et dispose d'une base de données en ligne qui permet aux utilisateurs d'accéder à plus de 1000 technologies à ERs.

Le logiciel RETScreen comprend actuellement une large gamme de modèles de technologies d'énergie propres ce qui offre la possibilité d'analyser une diversité de projets:

- Analyse de projets de centrales éoliennes;

- Analyse de projets d'installations photovoltaïques;
- Analyse de projets de chauffage à la biomasse;
- Analyse de projets de chauffage solaire de l'air;
- Analyse de projets de chauffage solaire de l'eau;
- Analyse de projets de pompes à chaleur géothermique;
- Analyse de projets de la réfrigération;
- Analyse de projets de la cogénération (chaleur et puissance);
- Analyse de projets de petites centrales hydroélectriques.

La procédure d'analyse de projets avec le logiciel RETScreen est standardisée et s'effectue en cinq étapes pour tous types de projets. Chacune de ces étapes est associée à une ou à plusieurs feuilles de calcul Excel.

L'organigramme de l'analyse standardisée du logiciel RETScreen est représenté par la figure (III .1), et qui peut être résumée en:

- Elaboration du modèle énergétique;
- Analyse des coûts;
- Analyse des réductions d'émissions de GES;
- Sommaire financier;
- Analyse de sensibilité et de risques.

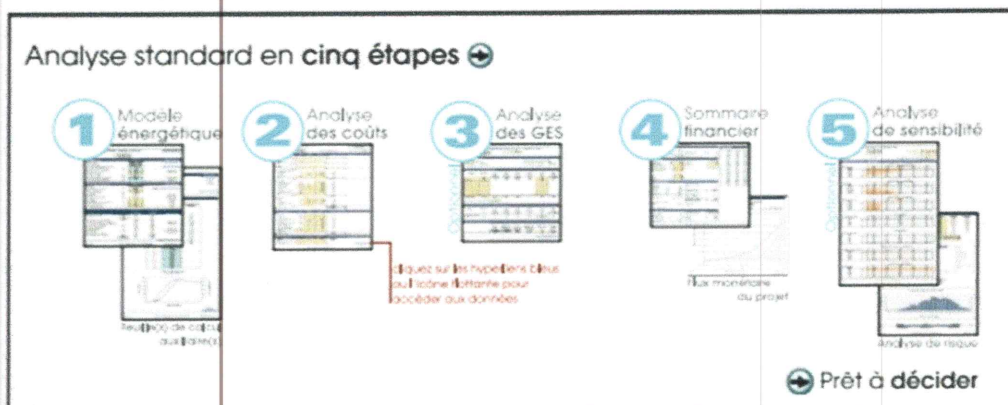


Figure III.1 : Organigramme de l'analyse standardisée du logiciel RETScreen.

III.2.2 LEAP

LEAP (Long-Range Energy Alternatives Planning System) est un outil de modélisation énergétique environnementale intégré, fondé sur des scénarios, élaboré par l'Institut de Stockholm pour l'environnement. Ses scénarios rendent compte de la manière dont l'énergie est consommée, transformée et produite dans un système énergétique donné, en

vertu d'une série d'hypothèses concernant la population, le développement économique, la technologie, les prix, etc. le logiciel LEAP est principalement un système de comptabilité, mais les utilisateurs peuvent également créer des modèles fondés sur la simulation économétrique. L'utilisateur peut mélanger et assortir ces méthodes selon les besoins dans une analyse donnée. LEAP comprend une base de données technologiques et environnementales, modulable (TED: Technological and Environmental Database) contenant des données concernant les coûts, les performances et les facteurs d'émission pour plus de 1000 technologies énergétiques. LEAP peut être utilisé pour calculer les profils des émissions des GES et peut être utilisé également pour la création de scénarios pour les émissions autres que ceux du secteur de l'énergie. La figure (III.2) ci-dessous représente l'espace de travail du logiciel LEAP [29,30].

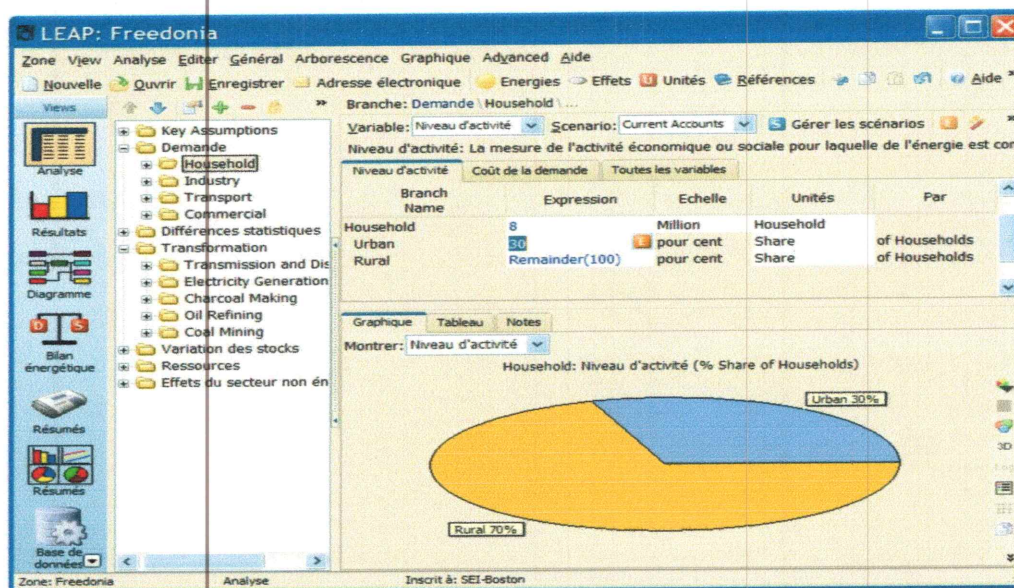


Figure III.2 : Espace de travail du logiciel LEAP.

III.2.3 iHOGA (improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms)

Anciennement connu sous le nom de HOGA, est un outil logiciel de simulation et d'optimisation des systèmes hybrides à ERs par algorithmes génétiques, développé en C++ par l'université de Zaragaza en Espagne. Il est utilisé pour le dimensionnement optimal et l'optimisation des systèmes hybrides comprenant des systèmes PV; des éoliennes, turbines hydroélectriques, piles à combustible, les réservoirs d'hydrogène ainsi que les systèmes à base de carburants fossiles. L'optimisation peut être mono-objective en minimisant le coût total du système représenté par le NPC ou bien multi-objective en minimisant également les émissions du CO₂ ou la charge non satisfaite. L'optimisation est basée sur l'utilisation

de deux algorithmes génétiques : le premier, dit algorithme génétique principal, est concerné par l'optimisation des composants du système hybride, le deuxième algorithme génétique dit secondaire est utilisé pour la stratégie de contrôle. Le logiciel permet également de faire l'analyse de sensibilité, et l'étude de l'effet de dégradation des composants du système [31]. La figure (III.3) représente l'espace de travail du logiciel iHOGA.



Figure III.3 : Espace de travail du logiciel Ihoga.

III.2.4 HOMER [32,33]

HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) est un logiciel de simulation et d'optimisation qui a été développé par le Renewable Energy Laboratory aux Etats-Unis en 1993 dans un premier but d'étudier des programmes d'électrification rurale.

C'est un outil informatique d'aide à la conception des systèmes d'énergie qui facilite la comparaison de différentes technologies de production d'énergie en offrant une large gamme d'applications.

HOMER simplifie la conception des systèmes de puissance connectés au réseau électrique et des systèmes hors réseau pour des applications autonomes et des applications de production décentralisées et pour servir des charges électriques et thermiques tout en combinant une multitude de ressources énergétiques : énergies solaire photovoltaïque, les éoliennes, l'énergie hydraulique, diesel, essence, biogaz, les réseaux électriques publics, les micro-turbines et les piles à combustible. HOMER offre également deux options de stockage : stockage électrochimique par batteries et le stockage d'hydrogène.

L'analyse et la conception d'un système de puissance est une tâche difficile en raison d'un grand nombre d'options de conception et de l'incertitude de certains paramètres tels que le profil de charge, le prix du carburant, les ressources renouvelables rajoutent à leur

tour un degré de complexité lors de la conception du système d'énergie à cause de leur nature intermittente et fluctuante ce qui influe largement sur la puissance de sortie de ces dispositifs; le logiciel HOMER a été conçu pour surmonter ces difficultés.

Pour utiliser HOMER, le modélisateur devrait fournir le modèle avec les entrées décrivant les courbes de charge électriques et thermiques, les options technologiques et leur efficacité énergétique, les caractéristiques techniques et économiques des composants du système, les coûts d'opération et de maintenance ainsi que les contraintes sur les émissions et les paramètres de sensibilité.

Le logiciel HOMER modélise et analyse le comportement physique du système de puissance et calcule son coût de cycle de vie, qui est le coût d'installation et de fonctionnement du projet sur sa durée de vie.

HOMER effectue trois tâches principales:

- Simulation;
- Optimisation;
- Analyse de sensibilité.

HOMER modélise les performances d'une configuration particulière du système en effectuant une simulation de son fonctionnement sur une base de temps d'une année (8760 heures) afin de déterminer la faisabilité technique et économique. Pour chaque heure, le logiciel effectue des calculs du bilan énergétique que peut produire le système et le compare avec la demande en énergie électrique ou thermique du système pour cette même heure. Une fois le calcul des bilans énergétiques est terminé, HOMER décide si cette configuration est réalisable ou non c.à.d. si elle répond aux contraintes imposées par le modélisateur. Si c'est le cas, HOMER évalue ensuite le coût du cycle de vie du projet.

L'analyse de sensibilité permettra d'étudier l'effet de l'incertitude de certaines variables d'entrée, sur lesquelles le concepteur n'a aucun contrôle (tels que vitesse du vent, intensité du rayonnement solaire, prix futurs du carburant, charge électrique...), sur la conception et le coût total du système. Toutes les analyses de sensibilité sont encore optimisées pour mieux connaître le comportement du système à long terme, ce qui permet au concepteur du

projet de traiter les incertitudes et donc prendre les meilleures décisions de conception. La figure (III.4) ci-dessous représente l'espace de travail du logiciel HOMER.

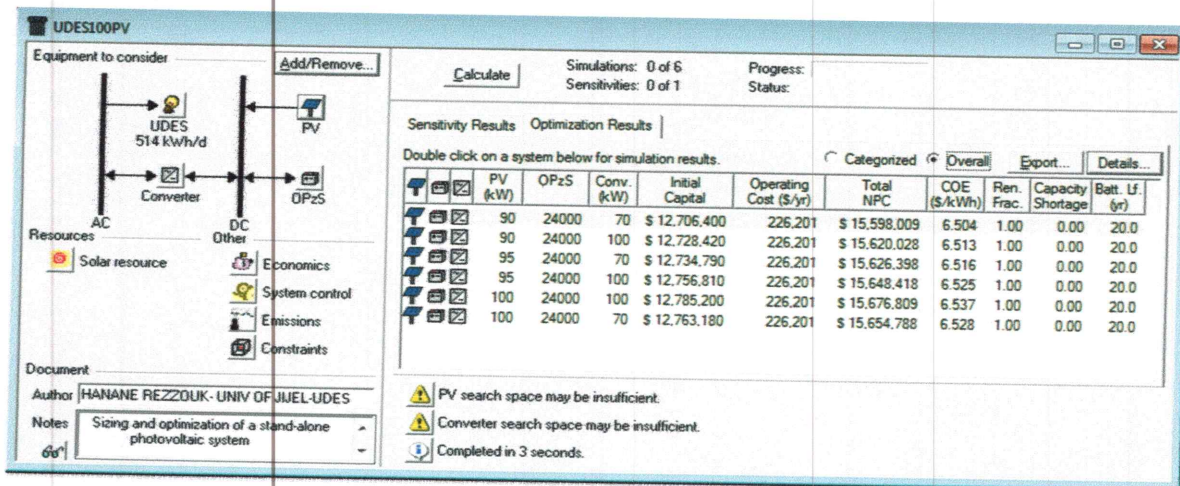


Figure III.4 : Espace de travail du logiciel HOMER.

➤ Simulation

La puissance du logiciel HOMER réside dans sa capacité d'étudier et d'analyser le système d'énergie à long-terme. Ses caractéristiques d'optimisation et d'étude de sensibilité reposent sur ses capacités de simulation.

Le processus de simulation permet de déterminer comment une combinaison particulière appelée configuration constituée de différents composants (sources d'énergie, système de stockage d'énergie, convertisseurs de puissance.....) de tailles différentes et sous une stratégie de fonctionnement particulière se comporteraient ensemble sur une longue période de temps égale à la durée de vie du projet.

HOMER offre la possibilité de simuler une grande variété de configurations comprenant:

- Générateur PV;
- Eoliens;
- Hydro-turbines;
- Générateurs diesel;
- Convertisseurs de puissance bidirectionnels AC-DC;
- Electrolyseur;
- Réservoir pour le stockage d'hydrogène;

Le système peut être raccordé au réseau électrique ou bien autonome et peut servir des charges électriques et des charges thermiques.

Le processus de simulation qu'effectue le logiciel HOMER sert à deux fins:

- Etude de la faisabilité du système;
- Estimation du coût total de l'installation et du fonctionnement du système sur sa durée de vie.

Durant la première phase dite « étude de faisabilité », le logiciel effectue pour chaque heure des calculs concernant les bilans énergétiques: calcul de l'énergie renouvelables produite par le système de puissance, la comparer avec la demande de la charge électrique, décider quoi faire avec l'énergie renouvelable en cas d'excès: stockage avec des batteries électrochimiques, injection sur le réseau électrique, et décider concernant la meilleure solution pour générer la puissance supplémentaire qui n'est pas satisfaite par les ressources renouvelables. Une fois HOMER termine les calculs sur une durée bien déterminée (une heure), il décide si cette configuration est faisable ou non c.-à-d. si elle répond aux contraintes imposées par le modélisateur concernant certaines quantités comme la contribution d'énergies renouvelables dans la production totale d'énergie électrique, la fraction de la demande électrique totale servie, les émissions des polluants, excès d'énergie électrique, la charge non satisfaite....etc. si c'est le cas HOMER passe à la deuxième phase du processus de simulation qui est le calcul du coût total du projet sur sa durée de vie.

Le coût de cycle de vie est une mesure pratique pour comparer les caractéristiques économiques des différentes configurations d'un système d'énergie. La quantité utilisée par HOMER pour représenter le coût de cycle de vie d'un système est le TNPC, cette valeur inclut les coûts et les revenus qui se produisent sur la durée de vie du projet:

- Coût capital initial de tous les composants constituant le système ;
- Le coût de remplacement des composants du système qui se produisent durant la durée de vie du projet ;
- Le coût total du carburant consommé sur la durée de vie du projet ;
- Le coût d'achat d'électricité à partir du réseau électrique si le système est connecté au réseau électrique ;
- Le coût de maintenance des composants du système ;
- Les revenus provenant de vente d'électricité au réseau électrique: cette quantité réduit le TNPC du système.

En parallèle, HOMER calcule des quantités nécessaires au calcul du NPC du système d'énergie comme la consommation annuelle du carburant, les heures de fonctionnement du

générateur diesel, la quantité d'électricité achetée ou vendue annuellement au réseau électrique.....etc.

HOMER simule le fonctionnement du système d'énergie sur une année avec un pas égal à une heure et suppose ensuite que les résultats clés obtenus de cette simulation sont représentatifs de toutes les années de la durée de vie du projet et ne prend pas en considération les changements qui peuvent survenir au fil du temps des variables sur lesquelles le modélisateur n'a aucun contrôle comme le profil de charge, le flux énergétique des ressources renouvelables, le prix du carburant, la dégradation des performances des composants constituant le système d'énergie.....etc.

HOMER modélise deux stratégies différentes de fonctionnement:

- **La stratégie d'expédition de la charge «load following strategy»:** sous cette stratégie de fonctionnement, les sources d'ERs charge les batteries lorsqu'il y a un surplus d'énergie après avoir alimenté la charge électrique tandis que les GDs ne le font pas et ne servent qu'à fournir le déficit d'énergie électrique à la charge lorsque les énergies renouvelables n'en suffisent pas.

- **La stratégie de cycle de charge «cycle charging strategy»:** sous cette stratégie de fonctionnement, à chaque fois que les GDs fonctionnent ils fournissent plus d'énergie que celle demandée par la charge électrique, et le surplus d'énergie est utilisé pour charger les batteries.

➤ **Optimisation**

Alors que le processus de simulation modélise une configuration particulière du système, le processus d'optimisation détermine la meilleure configuration possible du système.

Pour HOMER, la configuration optimale est celle qui satisfait les contraintes spécifiées par l'utilisateur au plus bas coût.

Trouver la configuration optimale du système signifie décider le mix de composants que le système devrait inclure, la taille et la quantité de chaque composant, et la stratégie de fonctionnement que le système devrait adopter pour gérer les différents flux énergétiques.

Dans le processus d'optimisation, HOMER simule de nombreuses différentes configurations du système, rejette celles qui ne sont pas faisables en fonction du TNPC et

considère la configuration faisable ayant le plus faible NPC comme la configuration optimale du système.

Le processus d'optimisation consiste à déterminer les valeurs optimales des variables décisives qui intéressent le modélisateur. Une variable décisive, par définition, est une variable que le modélisateur peut contrôler et qu'HOMER peut en considérer de multiples valeurs possibles dans son processus d'optimisation.

Les variables décisives possibles dans HOMER comprennent:

- La taille du champ PV;
- Le nombre des turbines éoliennes;
- La présence du système hydraulique (HOMER peut considérer une seule taille du système hydraulique; la décision est donc de savoir si le système de puissance devrait inclure le système hydraulique ou non);
- La taille de chaque générateur;
- Le nombre de batteries;
- La taille de convertisseurs DC-AC;
- La taille de l'électrolyseur;
- La taille du réservoir pour le stockage d'hydrogène;
- La stratégie de fonctionnement.

Afin de mieux comparer les configurations et les évaluer sur la base de leurs mérites techniques et économiques, HOMER offre un large éventail de graphiques et de tableaux.

➤ Etude de sensibilité

Parmi les fonctions les plus puissantes du logiciel HOMER est sa capacité à faire des analyses de sensibilité qui consiste en une série d'optimisations faite sur la base d'une série d'hypothèses sur les paramètres d'entrée du modèle tels que le prix du carburant, la durée de vie des composants, le prix d'électricité du réseau électrique,.... HOMER permet également de changer l'amplitude des données horaires comme la charge électrique primaire, les ressources énergétiques (solaire, éolienne, hydraulique, ou biomasse....) et ceci afin d'étudier leur impacts sur la conception et le coût total du système.

Toutes les analyses de sensibilité sont encore optimisées pour mieux connaître le comportement du système à long terme, ce qui permet au concepteur du projet de traiter les incertitudes et donc prendre les meilleures décisions de conception.

Sur la figure (III.5), est représentée la relation entre les trois processus: simulation, optimisation et analyse de sensibilité. D'après cette figure, l'ellipse simulation est incluse dans l'ellipse optimisation signifiant que l'optimisation consiste en plusieurs simulations, également l'ellipse d'analyse de sensibilité entoure l'ellipse optimisation ce qui signifie que l'analyse de sensibilité consiste en plusieurs optimisations.

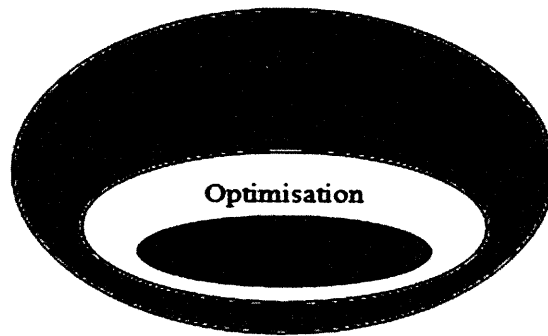


Figure III.5 : Schéma explicatif des processus simulation, optimisation et analyse de sensibilité du logiciel HOMER.

Le fonctionnement du logiciel HOMER est schématisé par la figure (III.6) :

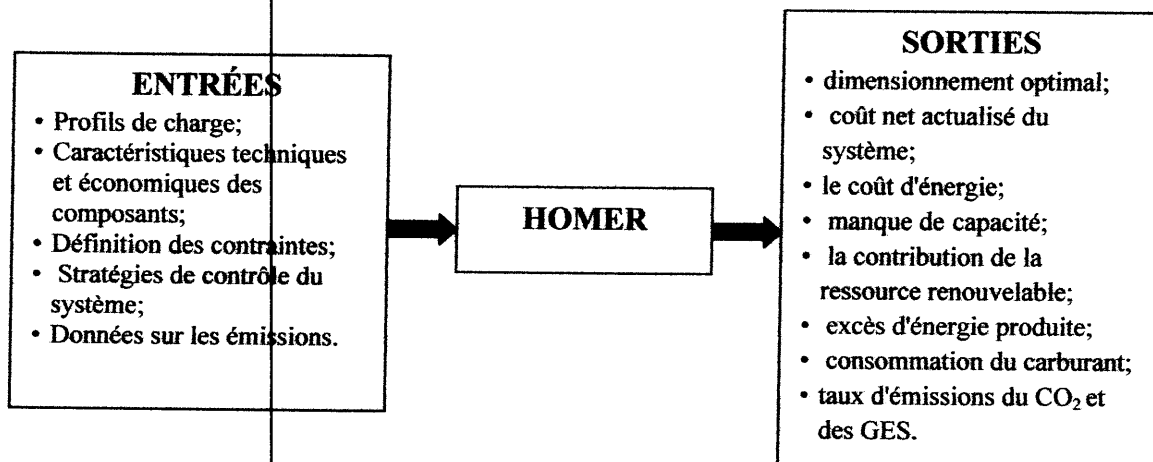


Figure III.6 : Schéma descriptif du logiciel HOMER [34].

III.2.5 HYBRID2

Ce logiciel a été développé par le Renewable Energy Research Laboratory (RERL) de l'université Massachusetts aux Etats Unis avec le soutien du National Renewable Energy Laboratory. HYBRID2 est un logiciel flexible et facile à utiliser pour l'étude des systèmes hybrides, c'est un outil d'aide à la prédiction, à long terme, des performances des SEHs; il permettra aux organismes intéressés à l'électrification rurale mais ayant des connaissances

limitées sur les systèmes hybrides d'évaluer les alternatives hybrides aux générateurs standards fonctionnant aux ressources fossiles. HYBRID2 est également suffisamment détaillé pour être utilisé par les concepteurs des systèmes hybrides expérimentés comme un outil d'étude préliminaire.

Hybrid2 contient principalement quatre parties qui sont l'interface utilisateur graphique, le module de simulation, le module économique et l'interface graphique des résultats. Grâce à l'interface utilisateur, le modélisateur peut construire son projet en décrivant les différents composants du système, la charge électrique, les données géographiques du site d'implantation et des ressources renouvelables ainsi que les données économiques qui se résument aux coûts des différents composants du système ainsi que d'autres paramètres économiques qui peuvent être utilisés pour évaluer les performances économiques. Une fois la description du système est faite, les modules de simulation et d'économie permettent de réaliser des simulations et d'effectuer l'analyse économique du projet. Hybrid2 fournit trois types de résultats de simulation : des fichiers de synthèse de performances (résumé des flux d'énergie cumulative, la consommation de carburant au cours de temps de simulation (durée de vie du projet)), des fichiers détaillés qui comprennent les valeurs de certains nombres de variables du système pour chaque pas de temps de simulation comme la puissance délivrée, la charge non satisfaite, la puissance produite par chaque unité de production, l'énergie stockée, les pertes de conversion de puissance, la consommation de carburant pour les systèmes hybrides contenant un GD et un fichier récapitulatif des caractéristiques du SEH. La figure (III.7) représente l'espace de travail du logiciel HYBRID2.

Hybrid2 présente la particularité d'avoir une approche mixte entre les approches probabiliste et série temporelle. L'approche série temporelle est utilisée pour illustrer les performances à long terme du système. La durée de simulation (ex : 1 année) est divisée en fraction de temps ou pas de temps (ex : 1 heure). Au sein de chaque pas de temps, une approche probabiliste est utilisée pour illustrer l'impact d'une variation rapide de charge ou de production intermittente [35,36].

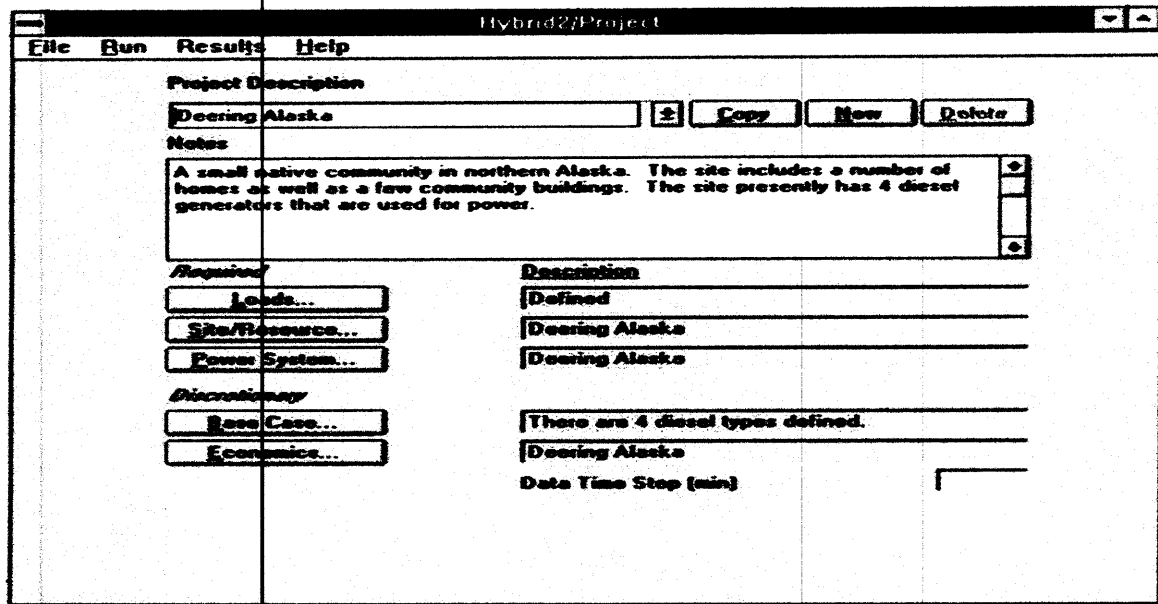


Figure III.7 : Espace de travail du logiciel HYBRID2.

III.2.6 TRNSYS (Transient Energy System Simulation Program)

C'est un logiciel de simulation des systèmes énergétiques modulaire, développé par le Solar Energy Laboratory de l'Université de Wisconsin en collaboration avec l'Université de Colorado aux Etats Unis en 1975. Initialement il a été développé pour la simulation des systèmes thermiques mais durant les 35 ans qui succédèrent sa création, le logiciel a bénéficié de plusieurs améliorations pour devenir un logiciel de simulation des systèmes hybrides couvrant un large spectre d'applications (solaire thermique et PV, le bâtiment basse énergie, systèmes de climatisation, systèmes d'ERs, la cogénération, les piles à combustibles, turbines à gaz, matériaux à changements de phase, etc.....).

Le simulateur décompose le problème en une série de petits composants qui peuvent être simples ou complexes. Les composants sont ensuite configurés et assemblés utilisant une interface visuelle totalement intégrée, connue sous le nom TRNSYS Simulation Studio, et les données d'entrée du modèle construit sont entrées par une interface visuelle dédiée (TRNBuild). La nature modulaire de TRNSYS facilite l'ajout de nouveaux modèles mathématiques de composants au programme et permet également aux utilisateurs d'incorporer directement des composants créés avec d'autres logiciels (Matlab/ Simulink, Excel/VBA). Le logiciel TRNSYS n'est pas un logiciel d'optimisation mais il réalise des simulations avec une grande précision. Le logiciel comporte plusieurs outils comme : le SIMCAD, TRNFOW, FAVENT, METEO NORM, TRNSED. La figure (III.8) représente l'espace de travail du logiciel TRNSYS [37,38].

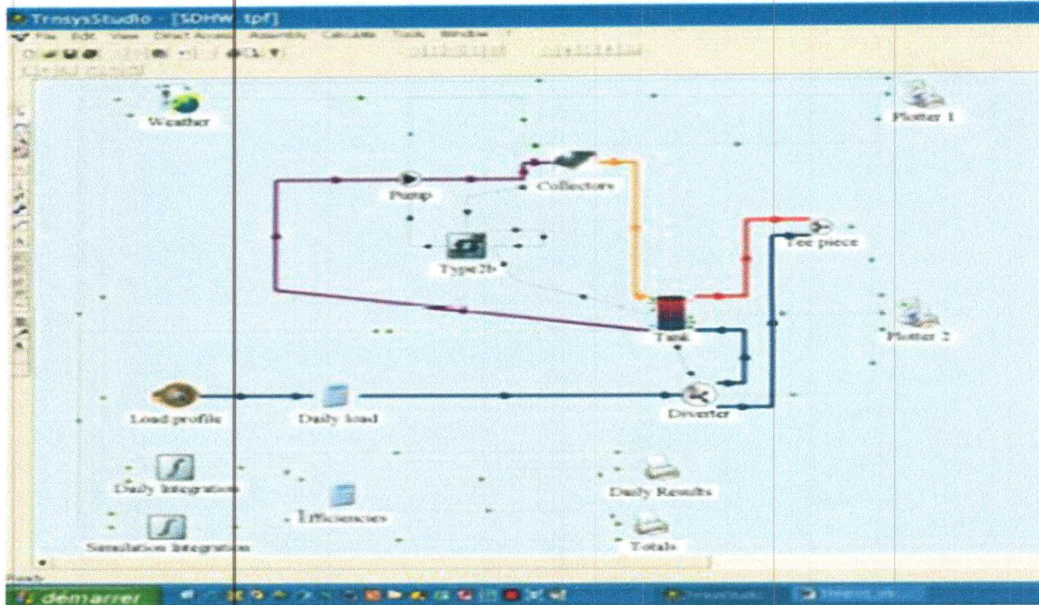


Figure III.8 : Espace de travail du logiciel TRNSYS.

III.2.7 RAPSIM (Remote Area Power Supply Simulator)

Ce logiciel a été développé par l'université de Murdoch à Perth en Australie au sein de l'institut « Energy Research Institute ». Il est utilisé pour simuler les systèmes PV-Eolien-Diesel-Batterie hybrides, et calculer leur coût total. Le logiciel calcule le coût total du système au cours de sa durée de vie et permet à l'utilisateur de modifier les paramètres des composants et d'étudier leur effets sur le coût total du système par exemple augmenter la taille du générateur PV, l'éolienne...). RAPSIM permet de calculer le coût total du système mais il est essentiellement un logiciel de simulation. Le logiciel RAPSIM n'est pas gratuit [34].

III.2.8 SOMES (Simulation and Optimization Model for Renewable Energy Systems)

Cet outil a été développé par l'université d'Utrecht aux Pays-Bas en 1992. Ce logiciel permet de simuler et d'analyser les performances des systèmes d'énergies renouvelables contenant principalement des sources d'ERs PV et éoliens, des GDs, réseau électrique, batteries et plusieurs types de convertisseurs. Ce logiciel permet d'effectuer une analyse technique et économique du SEH et une optimisation du coût de cycle de vie. Egalement, ce logiciel n'est pas gratuit [38].

III.2.9 SOLSIM

Le logiciel SOLSIM a été développé à Fachhochschule Konstanz en Allemagne. Il permet de simuler les performances des systèmes hybrides d'ERs. Le logiciel dispose



d'une variété de composants énergétiques qui permettent de simuler différents types de systèmes hybrides contenant des modules PV, éoliens, GDs, batteries et convertisseurs, aussi il permet la simulation et l'étude des installations biomasse et biogaz. Il permet, également, l'optimisation de l'angle d'inclinaison des modules PV ainsi que l'optimisation du coût de cycle de vie du système étudié. Le logiciel n'est pas disponible [38].

III.2.10 INSEL (Integrated Simulation Environment Language)

Il s'agit d'un programme de simulation et pas d'optimisation des systèmes d'ERs; développé à l'université d'Oldenburg. Le modèle du système à étudier peut être directement créé à partir des blocs existants dans l'éditeur graphique. Les champs d'application du logiciel INSEL couvrent le domaine de la simulation de l'irradiation solaire, et les applications PV et thermiques. Le logiciel dispose d'une base de données pour un grand nombre de composants tels que modules PV, onduleurs, capteurs thermiques ainsi que les paramètres météorologiques. INSEL est un logiciel à architecture ouverte qui offre une interface de programmation pour l'extension de la bibliothèque de composants. L'analyse de fonctionnement du système s'effectue dans des laps de temps sélectionnés par l'utilisateur. La figure(III.9) représente l'espace de travail du logiciel INSEL [39].

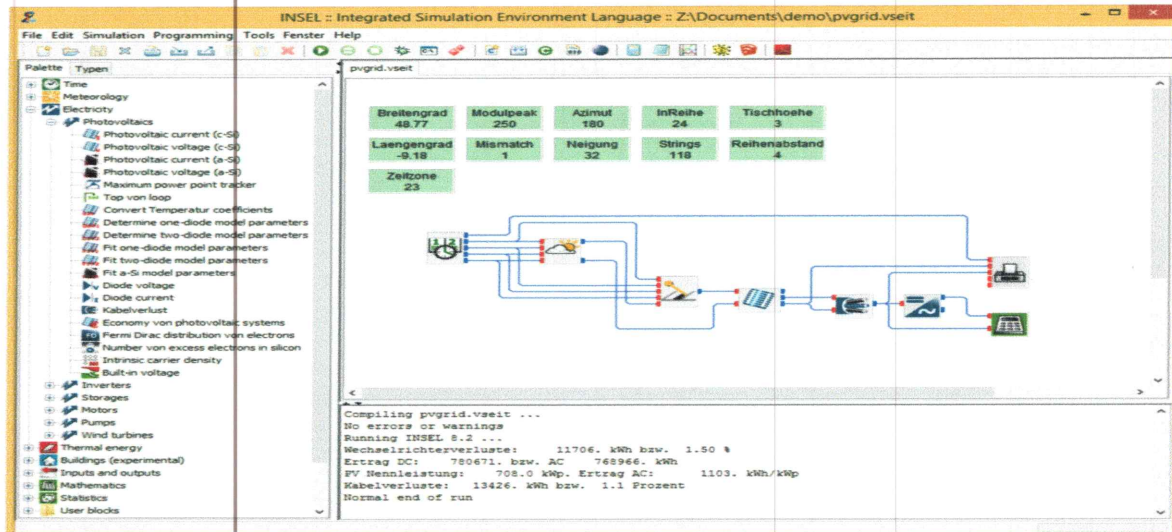


Figure III.9 : Espace de travail du logiciel INSEL.

III.2.11 ARES (Autonomous Renewable Energy Systems)

Ce programme a été développé à l'université de Cardiff au Royaume-Uni en 1995 et a été amélioré en 1997. ARES est destiné, principalement, à la simulation des systèmes PV-éolien avec batteries comme moyen de stockage d'énergie. Ce logiciel n'est pas disponible [40].

Les principales caractéristiques et capacités des différents logiciels étudiés dans les paragraphes précédents sont résumées dans le tableaux (III.1).

Tableau III.1 : Analyse des capacités et limites des outils logiciels pour SEHs.

Logiciel	Analyse économique	Analyse technique	Sys PV	Sys éolien	GD	Bat	Sys Hydro	Sys Bio	Sys Ther
RETScreen	X	X	X	X	-	X	-	-	-
HYBRID2	-	X	X	X	X	X	-	-	X
IHOGA	X	X	X	X	X	X	-	X	-
TRNSYS	X	X	X	X	X	X	-	-	X
RAPSIM	-	X	X	X	X	X	-	-	-
SOMES	X	X	X	X	-	X	-	-	-
SOLSIM	X	X	X	X	X	X	X	-	-
INSEL	-	X	X	X	X	X	-	-	X
ARES	-	X	X	X	X	X	-	-	-
HOMER	X	X	X	X	X	X	X	X	-

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une revue des logiciels utilisés pour l'étude des systèmes d'énergie hybrides. Ces logiciels peuvent être classifiés en différentes catégories selon leur capacités d'analyse: des logiciels d'étude de faisabilité comme le RETScreen et le LEAP, des logiciels de simulation comme le Hybrid2, INSEL, SOLSIM, TRNSys, ARES, RAPSIM, et des logiciels d'optimisation comme le HOMER, le iHOGA, et le SOMES. Selon l'analyse effectuée sur les capacités de chaque logiciel, HOMER est le logiciel le plus puissant et le plus utilisé car il regroupe un maximum de combinaisons de systèmes à énergies renouvelables et il permet de faire une optimisation et une analyse de sensibilité qui rend l'étude et l'analyse de plusieurs configurations des systèmes énergétiques plus rapide et plus facile. Homer est également un logiciel gratuitement téléchargeable sous licence.

CHAPITRE IV

Etude technique et économique des différentes configurations du système d'énergie.

Chapitre IV

Etude technique et économique des différentes configurations du système d'énergie.

Introduction

L'hybridation des générateurs de puissance renouvelables avec des générateurs conventionnels a des retombées techniques, économiques et environnementales importantes comme nous allons le voir dans ce chapitre.

Le but de l'étude qui sera menée dans ce chapitre est:

- Etudier les avantages techniques, économiques et environnementaux issus de l'hybridation de la ressource solaire, la ressource éolienne avec les générateurs conventionnels diesel;
- Déterminer le seuil optimum de la contribution solaire dans le SEH qui assure la stabilité et la rentabilité économique du système;
- Déterminer les paramètres décisifs qui influent sur le choix de la configuration optimale (taille de chaque composant du système) sous les conditions environnementales locales du site d'étude;
- Déterminer l'influence de la taille du système de stockage sur le choix d'une configuration du système d'énergie et la juger optimale par rapport à une autre et son influence sur le coût global du système et le coût de revient d'énergie et aussi étudier son impact sur la détermination de la contribution optimale de la ressource solaire dans le système énergétique.

Le site choisi pour notre étude est une maison située à Tipaza. Ce site a été choisi en raison de la disponibilité des données météorologiques et les données de la charge électrique.

Afin d'atteindre les objectifs prédéfinis, nous allons analyser les aspects énergétiques, techniques, économiques et environnementaux des systèmes énergétiques.

IV.1 Caractéristiques géographiques du site

Les coordonnées géographiques du site d'implantation sont données dans le tableau (IV.1). La latitude spécifie la localisation du site sur la surface de la terre. C'est une variable importante utilisée pour calculer les valeurs de l'irradiation solaire à partir des indices de clarté et vice versa.

Tableau IV.1 : Caractéristiques géographiques du site.

Site	Longitude [°]	Latitude [°]	Altitude [m]	Location
Caracteristiques	2°42'	36°39'	5	Bou-Ismaïl, tipaza, Algérie

IV.2 Application au site

Afin de déterminer le système hybride qui est économiquement rentable, une étude comparative des aspects économiques, énergétiques et environnementaux entre les différents systèmes sera élaborée. Les systèmes diesel, éolien autonome et PV autonome seront étudiés à titre comparatif afin de mettre en évidence les avantages issus de l'hybridation des ressources conventionnelles avec des ressources renouvelables. Pour notre étude nous allons utiliser le logiciel HOMER présenté dans le **Chapitre III**.

Les variables de dimensionnement à introduire dans notre étude est :

- La puissance crête du système PV;
- La puissance nominale des générateurs diesels;
- La puissance nominale des générateurs éoliens;
- La puissance nominale des convertisseurs de puissance;
- La capacité du système de stockage.

D'autres données économiques, techniques et environnementales sont aussi nécessaires pour les simulations:

- Données d'irradiation solaire horaire;
- Données de la vitesse du vent ;
- Profil de la charge électrique;
- Spécifications techniques des composants;
- Spécifications économiques des composants;
- Stratégie de contrôle du système hybride;

- Durée de vie du projet;
- Le taux des émissions de dioxyde de carbone et autres polluants par litre de carburant brûlé.

Les données relatives aux profils de charge, au profil de la ressource solaire, au profil de la ressource éolienne et au prix du diesel sont supposées inchangées sur toute la durée de vie du projet.

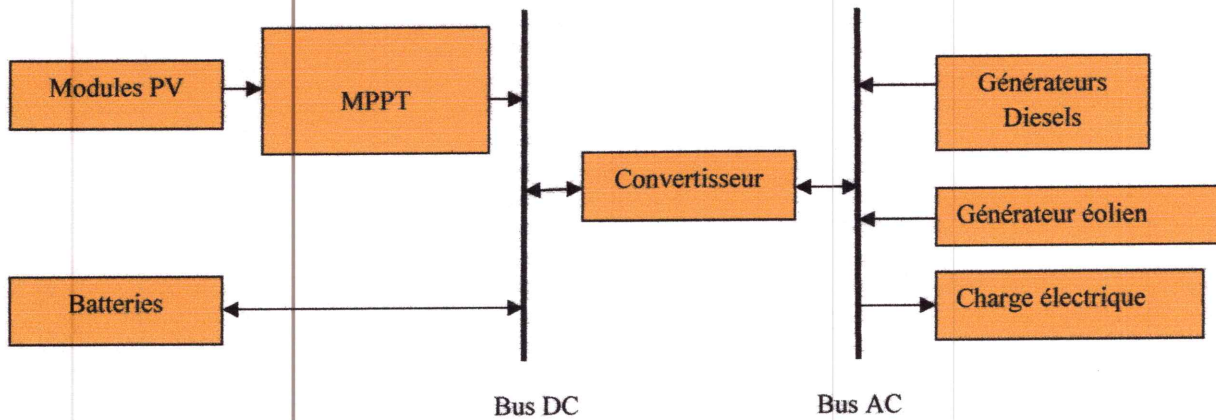
Pour chaque cas d'étude, le logiciel HOMER effectue plusieurs simulations, pendant le processus d'optimisation, afin de déterminer les configurations optimales qui sont économiquement et techniquement faisables pour chaque cas d'étude et qui répondent aux contraintes que nous avons imposé. HOMER classe ces configurations selon leurs NPCs dans un ordre ascendant. La configuration optimale est toujours la première configuration.

Le choix d'une configuration par rapport à une autre est basé principalement sur des critères économiques et énergétiques. Concernant l'étude économique; deux critères financiers peuvent être utilisés afin de comparer les différentes configurations des systèmes d'énergie. Généralement, l'analyse économique est effectuée sur la base des coûts du cycle de vie du projet (TNPC) ainsi que le coût du kilowattheure d'électricité généré par le système d'énergie (COE). Différents coûts de composants y compris les coûts d'installation, les coûts du carburant et de fonctionnement, coûts de maintenance, coût de remplacement, valeur de récupération des composants à remplacer sont aussi calculés et peuvent être aussi utilisés pour faire des études comparatives.

D'autres critères techniques et énergétiques sont à prendre en considération lors de la sélection de la configuration optimale du système d'énergie comme la satisfaction de la charge (à 100%), la consommation spécifique des GDs, les coûts O&M, l'excès d'énergie qui devrait être minimisé, taux d'émission des gaz à effet de serre.

IV.2.1 Architecture du système hybride

Le système d'énergie hybride étudié se compose de modules photovoltaïques, des générateurs éoliens, des batteries électrochimiques pour le stockage d'énergie, des convertisseurs de puissance bidirectionnels et des générateurs diesels. La figure (IV.1) montre la structure du système hybride PV-Diesel-éolien-batteries.



FigureIV.1: Structure du système hybride PV-diesel-éolien-batteries.

IV.2.1.1 Modules photovoltaïques

Un module photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu qui se compose d'un nombre variable de cellules photovoltaïques connectées électriquement en série et en parallèle. Les modules photovoltaïques monocristallins ont été utilisés dans cette étude.

IV.2.1.2 Les batteries électrochimiques

Ce sont des dispositifs utilisés pour emmagasiner l'énergie électrique sous forme chimique pour servir la charge électrique. Si les batteries sont chargées à moins 30%, le générateur diesel prend la relève et commence à alimenter la charge électrique. La batterie HOPPECKE (2V, 500Ah) a été choisie dans ce travail à partir de la liste offerte par le logiciel HOMER.

IV.2.1.3 Convertisseur de puissance

Le convertisseur de puissance est requis dans les systèmes de puissance pour convertir l'énergie électrique AC générée par le générateur diesel en courant continu pour charger les batteries dans ce cas il est appelé redresseur ou bien pour travailler en mode (DC-AC) et dans ce cas il est appelé onduleur.

IV.2.1.4 Générateur diesel

Les générateurs diesel sont utilisés pour répondre à la demande de la charge électrique lorsqu'elle n'est pas satisfaite par les systèmes ERs ou lorsque les batteries sont déchargées.

IV.2.1.5 Générateur éolien

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle est généralement utilisée pour produire de l'électricité. L'éolienne SW Skystream 3.7 a été utilisée dans cette étude.

IV.2.2 Stratégie de contrôle et de gestion du système hybride

La stratégie de contrôle utilisée dans notre étude est la stratégie de cycle de charge, c'est une stratégie de répartition d'énergie selon laquelle à chaque fois qu'un générateur diesel doit fonctionner pour servir la charge électrique primaire, il fonctionne à pleine puissance de sortie. La puissance électrique excédentaire est utilisée pour charger le banc de batteries. Puisque nous avons spécifié une consigne de cycle de charge donc le générateur diesel ne cesse pas de fonctionner jusqu'à ce que les batteries soient totalement chargées.

IV.2.3 Evaluation de la ressource solaire

Les données du rayonnement solaires sont essentielles pour assurer la précision de la conception du système d'énergie. Les données d'irradiation du site UDES disponibles ont été obtenues à partir du site NASA et sont représentées par la figure (IV.2), ces données seront utilisées en vue de l'étude des différentes configurations des systèmes énergétiques. Dans le tableau (IV.2), sont représentées les valeurs de l'irradiation solaire journalière globale reçue par mètre carré (KWh/m²/J) ainsi que les valeurs de l'indice de clarté.

Tableau IV.2 : Irradiation solaire globale et indice de clarté du site de l'UDES.

Mois	Indice de clarté	Irradiation Solaire (Kwh/m ² /J)
- Janvier	0.482	2.313
- Février	0.506	3.117
- Mars	0.523	4.199
- Avril	0.528	5.203
- Mai	0.545	6.039
- Juin	0.588	6.789
- Juillet	0.597	6.743
- Août	0.618	6.353
- Septembre	0.589	5.085
- Octobre	0.537	3.598
- Novembre	0.491	2.504
- Décembre	0.483	2.121

Les valeurs de l'irradiation solaire moyenne journalière du site varient dans un intervalle de 2.120KWh/m²/Jour et 6.795KWh/m²/Jour. La valeur moyenne annuelle de l'irradiation solaire est égale à 4.512KWh/m²/Jour avec un indice de clarté égal à 0.553.

Les périodes de haute intensité de rayonnement solaire sont observées à partir du mois d'Avril (5.198 Kwh / m² / jour) jusqu'au mois de Septembre (5.085 Kwh / m² / jour) avec les intensités les plus élevées en mois de Juin et Juillet (6,795 kWh / m² / jour et 6.740 Kwh / m² / jour respectivement), quant à la plus faible intensité elle est observée en Décembre (2.120 Kwh / m² / jour).

La figure (IV.2) représente l'éclairement solaire global moyen journalier reçu sur une surface horizontale. La latitude du lieu est utilisée pour calculer l'irradiation solaire journalière moyenne à partir de l'indice de clarté et vice versa, dans notre cas nous avons introduit les valeurs de l'irradiation solaire et les indices de clarté ont été ensuite calculés par le logiciel HOMER. Sur la figure (IV.3) est représenté l'éclairement solaire sur une surface inclinée égale à la latitude du lieu (36,39°).

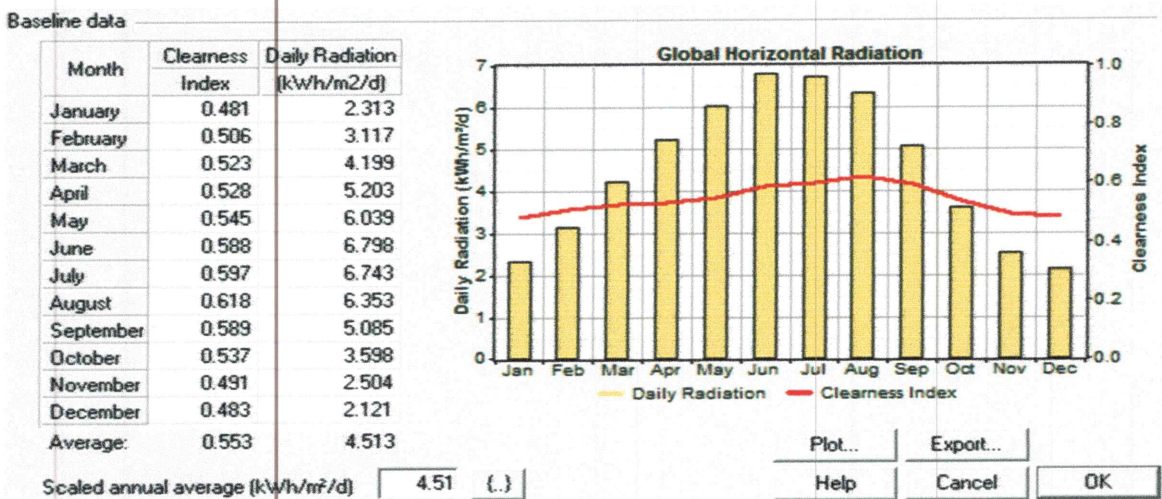


Figure IV.2: Irradiation solaire globale reçue sur un plan horizontal.

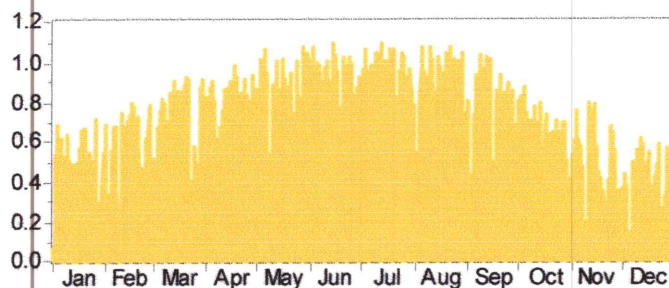


Figure IV.3: Irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné égal à la latitude du lieu.

IV.2.4 Evaluation de la ressource éolienne

Les données du gisement éolien sont essentielles pour assurer la précision de la conception du système d'énergie. Les données de la vitesse de vent du site UDES sont représentées par la figure (IV.4), ces données seront utilisées en vue de l'étude des différentes configurations des systèmes énergétiques. La valeur moyenne de la vitesse de vent est de 5 m/s.

La figure (IV.4) représente la vitesse du vent moyenne journalière dont l'altitude au niveau de la mer est de 200 m, ensuite utilisées par le logiciel HOMER.

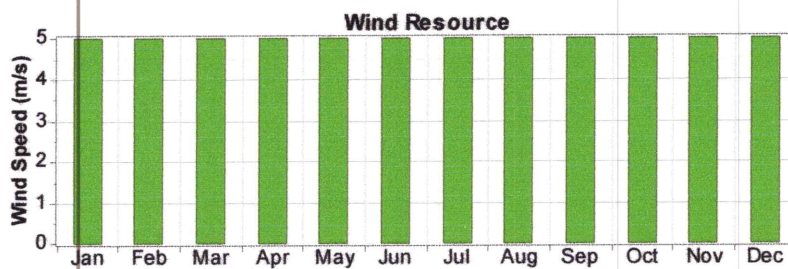


Figure IV.4: Vitesse du vent du site de l'UDES.

IV.2.5 Description du Profil de Charge

Le dimensionnement optimal du système d'alimentation dépend de la quantité d'énergie électrique requise par l'ensemble des appareils. La description du profil de charge consiste à définir l'énergie électrique consommée par tous les appareils électriques tels que : four électrique, le séchoir, la machine à laver, réfrigérateur, ordinateurs, TV, climatiseurs, chauffage, fer à repasser Le moment de la sollicitation maximale de l'énergie électrique par la charge varie d'une saison à l'autre. Ainsi, dans cette étude, trois profils différents, sont utilisés, ce qui reflète la variation saisonnière de la consommation d'électricité; nous avons considéré un profil de charge pour l'hiver un autre pour l'été et un troisième profil pour l'automne et au printemps. Les profils de charge pour alimenter en énergie électrique sont représentés sur la figure (IV.5) [41]. Nous remarquons que les profils de consommation ont la même forme pour les trois périodes de l'année (hiver, automne / printemps, été).

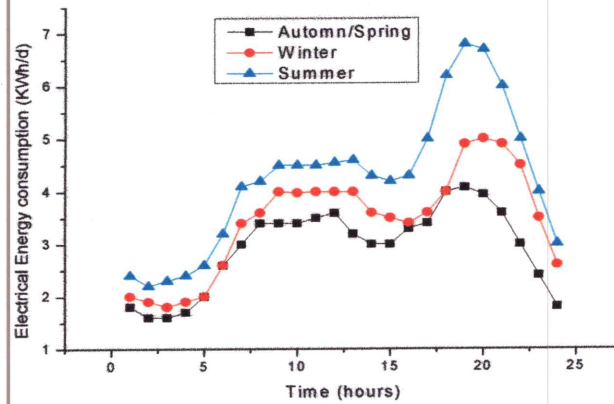


Figure IV.5: Profil de charge.

IV.2.6 Spécifications techniques et économiques du système d'énergie hybride

Les caractéristiques techniques et économiques des composants constituant le SEH sont résumées dans le tableau (IV.3).

Tableau IV.3 Caractéristiques techniques et économiques des composants du système hybride

Description	Caractéristiques techniques et économiques
Modules Photovoltaïques	
Technologie	REC Solar
Coût Capital	5678 \$
Coût de remplacement	5678 \$
Coût d'opération et de maintenance	0 \$
Durée de vie	25 ans
Facteur de déclassement	90
Système de poursuite	Two Axis
réflectance du sol (%)	20
Batteries	
Technologie	Hoppecke-1-10 OPzS 1000
Tension nominale	2 volts
Capacité nominale	500Ah
Coût Capital	506 \$
Coût de remplacement	506 \$
Coût d'Opération et de maintenance	4 \$
Etat de décharge minimal	30%
Convertisseur de puissance	
Technologie	EFFECTA
Coût Capital	734 \$
Coût de remplacement	734 \$
Coût d'Opération et de maintenance	2 \$
Générateur Diesel	
Coût Capital	313 \$
Coût de remplacement	313 \$
Coût d'Opération et de maintenance (\$/heure)	0.02
Générateur éolien	
Technologie	SW skystream3.7
Coût Capital	60000 \$
Coût de remplacement	40000 \$
Coût d'Opération et de maintenance	300 \$

IV.2.7 Prix du diesel

Selon une étude réalisée par la GIZ; la société allemande spécialisée dans l'expertise multisectorielle au niveau régional et international, l'Algérie est classée parmi les dix premiers pays où le carburant est moins cher dans le monde [42]. Actuellement, le prix du

diesel en Algérie est de 13,5 Dinar Algérien (DA) par litre, ce qui est équivalent à 0,1685\$/ L.

IV.2.8 Durée de vie du projet

Lors de l'étude d'un système d'énergie, une durée de vie est spécifiée au projet, généralement elle est choisie égale à la durée de vie du composant du système énergétique ayant la plus grande durée de vie, dans notre cas c'est le module PV avec une durée de vie égale à 25 ans. Donc la durée de vie du projet est égale à 25 ans, le taux d'intérêt réel est égal à 6%.

IV.3 Etude des systèmes énergétiques

IV.3.1 Systeme Diesel Autonome

L'architecture du système énergétique diesel autonome est représentée par la figure (IV.6). il constitué d' un générateurs diesel et d'un bus AC.

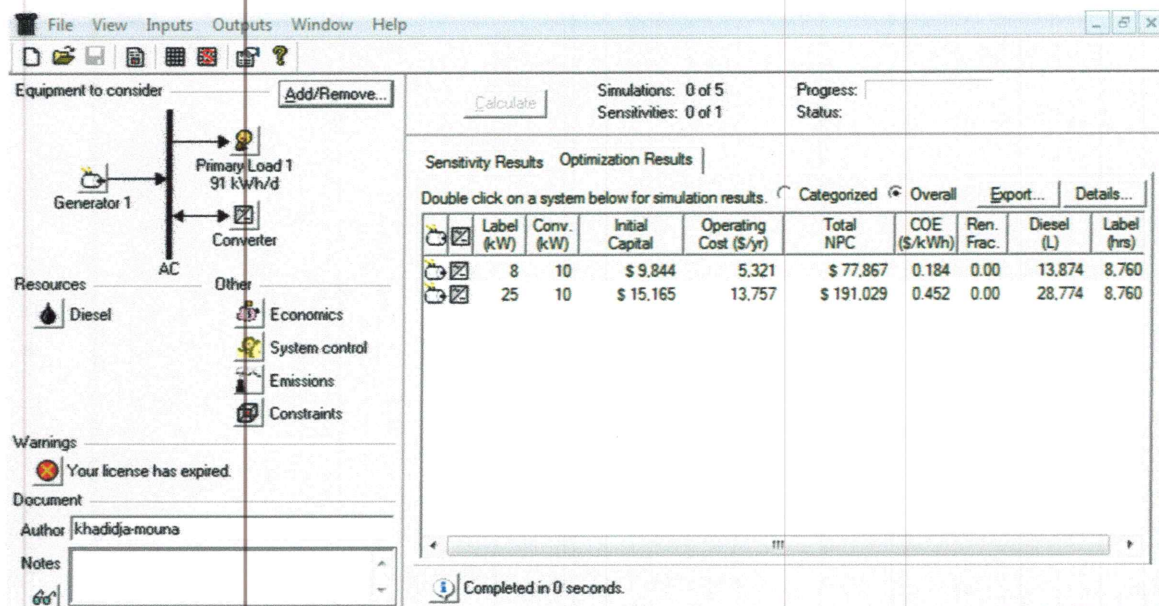


Figure IV.6 : Architecture du système diesel autonome.

La configuration optimale du système énergétique diesel autonome consiste d'un générateur diesel d'une puissance nominale de 8KW . Ce système satisfait la charge électrique annuelle à 100% (33069KWh/an) avec 0.002% comme excès d'énergie. Le générateur diesel a été programmé pour fonctionner toute la journée pour couvrir la charge électrique jour et nuit.

La figure (IV.7) illustre la puissance électrique moyenne mensuelle produite par le système diesel.

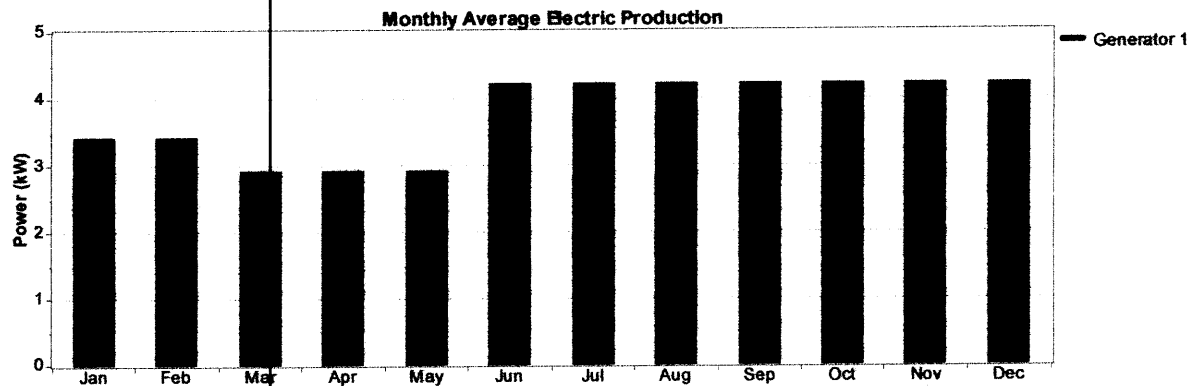


Figure IV.7: Production énergétique mensuelle moyenne du système diesel autonome.

Les caractéristiques électriques du système diesel autonome sont représentées dans le tableau(IV.4). Le générateur fonctionne 8760 (hrs/An) et contribue avec 100% de la production totale d'énergie électrique du système. Pour ceci, le GD consomme environ 13874 litres de carburant annuellement avec une consommation spécifique de 0.420(L/KWh).

Tableau IV.4: Caractéristiques techniques et électriques du système diesel autonome.

Composants du système	Taille (KW)	Production Électrique	Éxcès d'électricité	Charge non satisfaite	Nbre d'heures d'opération (hrs/An)	Consommation du carburant (L/an)	Consommation spécifique du carburant (L/KWh)
DG	8	33069	0.02%	00 (0%)	8760	13874	0.420

Le coût actuel net du système diesel-seul a été estimé égal à 77867\$, et le coût d'énergie est égal à 0.184\$/KWh. Les détails du coût global du système sont donnés par le tableau (IV.5), le coût net actuel du système inclut le coût capital, le coût de remplacement, le coût d'opération et de maintenance, le coût de carburant, et le coût de récupération. La figure (IV.8) représente la répartition du coût total du système en fonction des différents coûts cités ci-dessus; le coût de consommation du carburant diesel est la composante la plus coûteuse du système (2337.769\$/an) qui est considérée importante par rapport aux coûts d'installation. Cette caractéristique est le principal inconvénient des systèmes diesel autonomes où beaucoup d'argent est dépensée sur le carburant pour satisfaire la charge sur la durée de vie du projet. En fait le coût du carburant n'est pas stable ce qui pourrait avoir

comme conséquence l'augmentation du coût total du système et par la suite augmenter le coût moyen de l'énergie électrique produite par le système.

Tableau IV.5: Caractéristiques économiques du système diesel autonome.

Composants du système	Taille (KW)	capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	carburant (\$)	Récupération (\$)	N.P.C (\$)	L.C.O.E (\$/Kwh)	coût d'opération (\$/an)
DG	8	2504	17962	17917	29885	-233	77867	0.184	5321

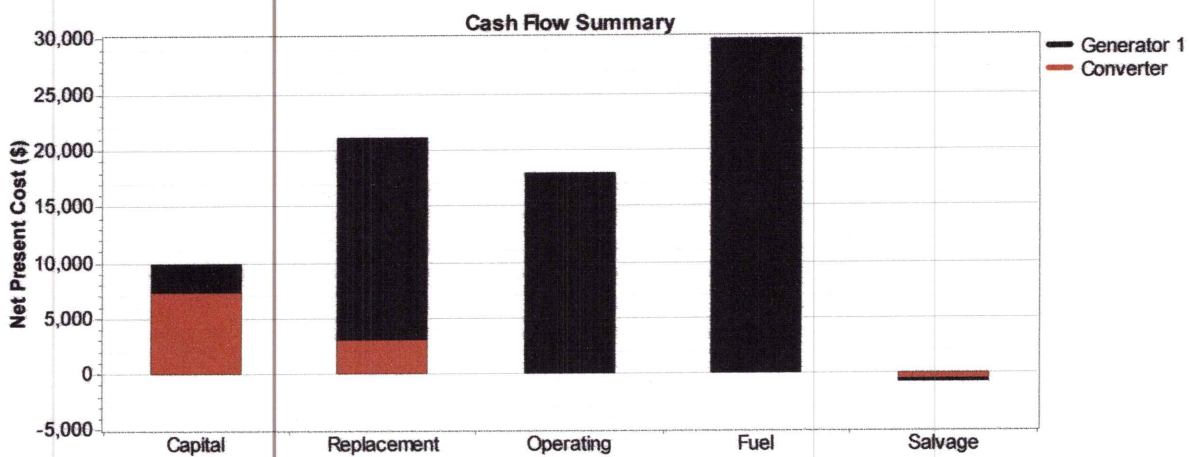


Figure IV.8: Coût net actuel du système diesel autonome en fonction des différents coûts de cycle de vie.

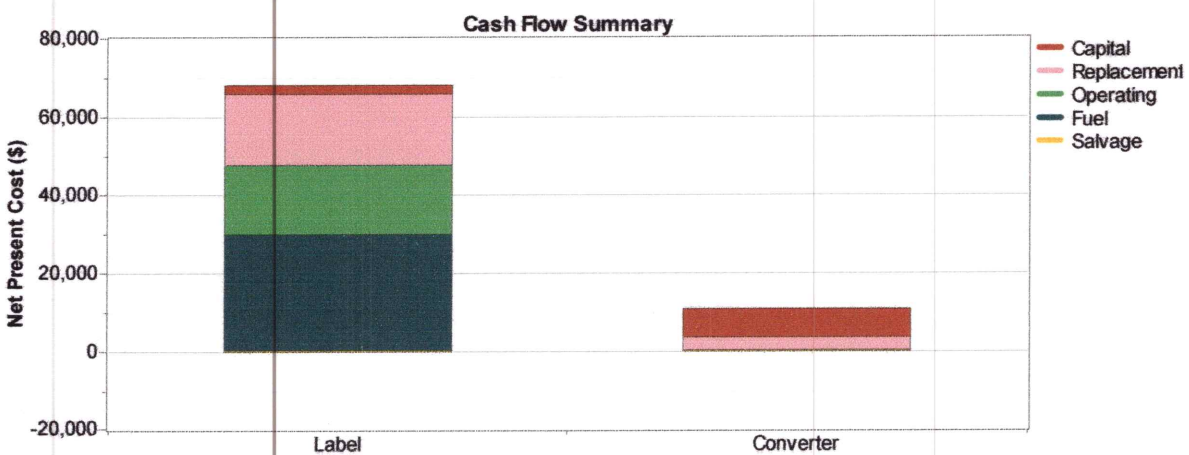


Figure IV.9: Coût net actuel du système diesel autonome en fonction des coûts des composants du système.

L'absence d'une ressource renouvelable dans ce système a augmenté la quantité de carburant consommé pour son opération, par conséquent, environ 36.535 kgs/an de CO₂ ont été éjectés dans l'atmosphère locale. La combustion du carburant conduit à émettre non

seulement du CO₂, mais aussi de grandes quantités d'autres polluants et de GES comme montré par le tableau (IV.6) ces émissions sont nocives pour l'environnement du moment qu'elles contribuent à l'effet de serre responsable du réchauffement climatique et de la destruction de la couche d'ozone.

Selon [43], il ya une relation directe entre la quantité de polluants rejetés dans l'atmosphère et le réchauffement de la planète; l'émission d'un trillion de tonnes de carbone provoque un pic de réchauffement de 2°C. La quantité totale de polluants émis par le système diesel autonome a été estimée à environ 37519.42 kg/an; les détails de ces émissions sont donnés dans le tableau (IV.6).

Tableau IV.6: Emissions du système diesel autonome.

Polluants	Dioxyde de carbone	Monoxyde de carbone	Les hydrocarbures non-brulés	Matières particulaires	dioxyde de soufre	oxydes d'azote
Emissions (Kg/An)	36535	90.2	9.99	5.83	73.4	805

IV.3.2 Système PV autonome

L'architecture du système PV autonome est représentée par la figure (IV.10), il est constitué d'un champ PV qui représente la source principale d'énergie, de batteries électrochimiques pour le stockage d'énergie , d'un bus AC auquel est connectée la charge électrique et d'un bus DC relié au champ PV et au système de stockage. Les deux bus AC et DC sont connectés via un convertisseur.

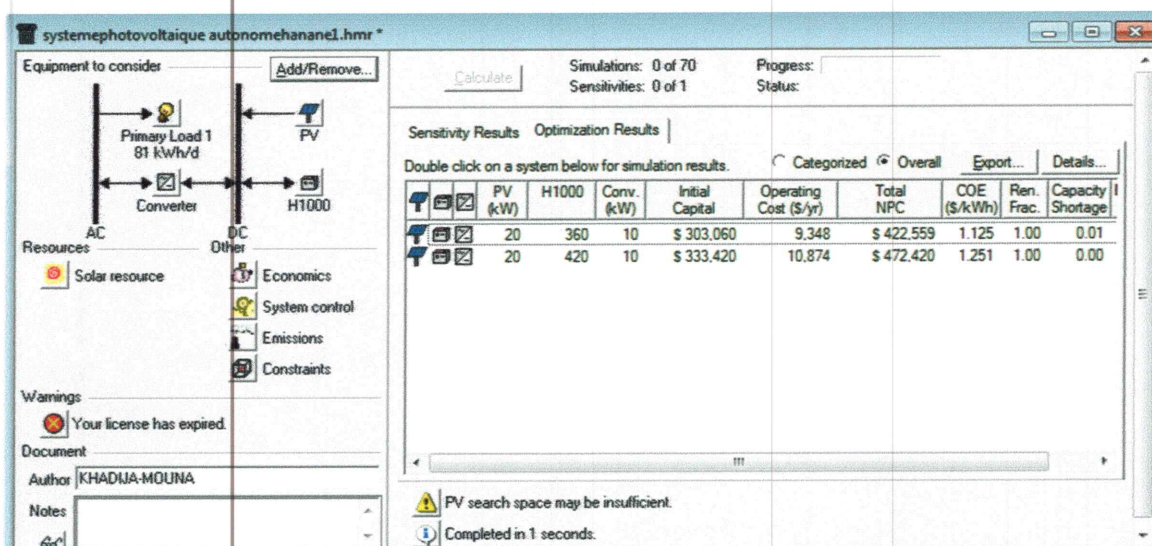


Figure IV.10: Architecture du système PV autonome.

Les résultats de simulation optimisés sont représentés par la figure (IV.10). L'utilisation d'un système produisant une énergie supérieure au pic prédéfini de la charge électrique est hors considération car ceci aura pour effet directe la génération de valeurs plus élevées du coût global du système et du coût énergétique.

La configuration optimale du système PV autonome, représentée par le tableau (IV.7), est constitué d'un champ PV d'une puissance crête de 20KWc, un système de stockage d'une capacité nominale de 360KWh, un convertisseur bi-directionnel d'une puissance nominale de 10KW.

Tableau IV.7: Composants du système PV autonome.

Composant	Champ PV	Batteries	Convertisseur
Taille	20KWc	360KWh	10KW

Le système produit annuellement 46835KWh d'énergie électrique avec seulement 12107 KWh produite en excès qui est équivalente à 25.9%. La proportion de la charge électrique non satisfaite est nulle. La production énergétique annuelle du système PV est représentée par la figure (IV.11).

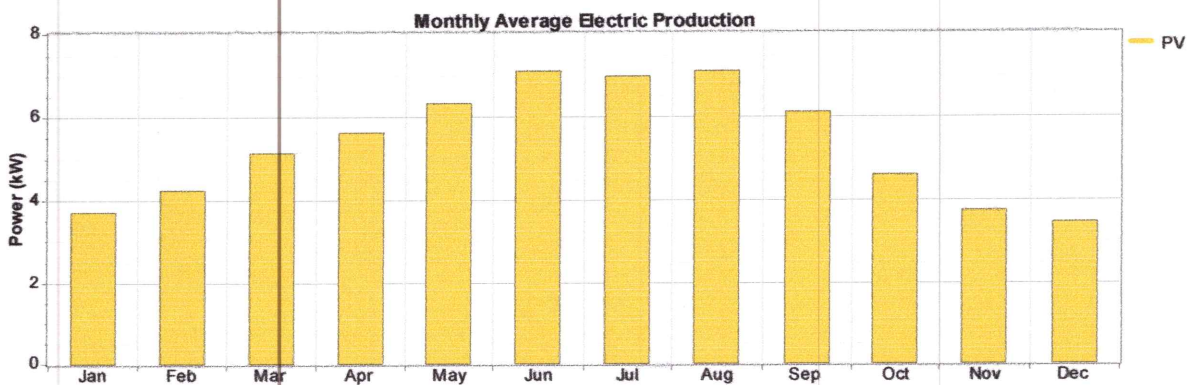


Figure IV.11: Production énergétique mensuelle du système PV autonome.

L'analyse économique du système énergétique est détaillée dans le tableau (IV.8) où tous les détails des coûts relatifs à chaque composant du système sont donnés: le coût capital, le coût de remplacement, le coût d'opération et de maintenance, le coût de récupération, ainsi que le NPC du système, et le coût du kilowatt heure d'énergie. La figure (IV.12) représente le coût total net relatif à chaque composant du système énergétique (le champ PV, le système de stockage et le convertisseur). La figure (IV.13) représente le coût total net du système en fonction des différents types de coûts. Une analyse des résultats présentés dans le tableau (IV.8), figures (IV.12) et (IV.13), montre

que le système PV autonome nécessite un coût capital initial important dû principalement au coût initial du système de stockage du coût initial du système, le système de stockage affecte aussi le coût de remplacement du système. Egalement, les coûts d'O&M reviennent à 100% au système de stockage. ce qui a induit un coût de revient d'énergie électrique très élevé (1.125\$).

Tableau IV.8: Caractéristiques économiques du système PV autonome.

Composant	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	Carburant (\$)	Récupération (\$)	Total (\$)	COE (\$/KWh)
Champ PV	113 560	0	0	0	0	113560	1.125
Système de stockage	182160	56798	92040	0	-31832	299166	
Convertisseur	7340	3063	0	0	-570	9833	
Système	303060	59861	92040	0	-32402	422 559	

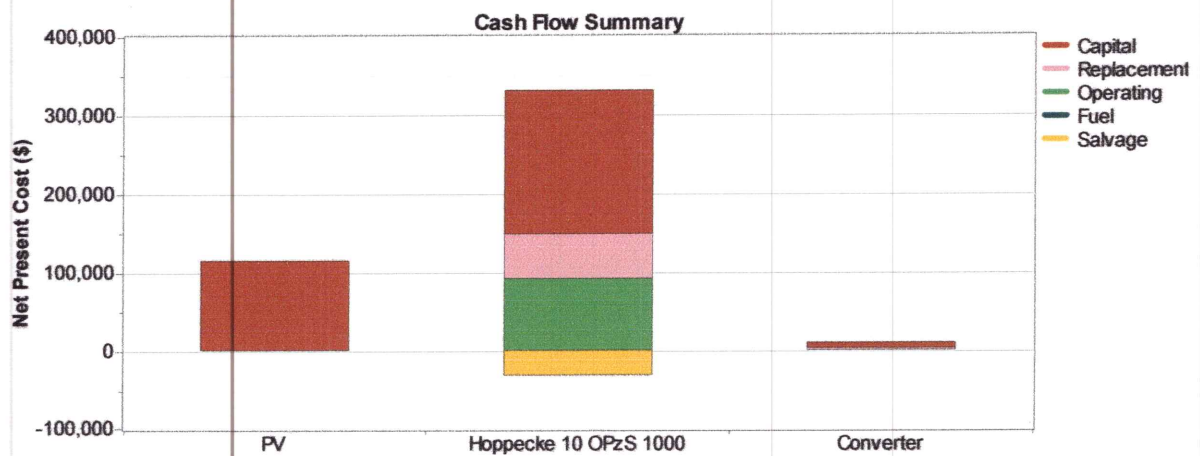


Figure IV.12: Coût net actuel du système PV autonome en fonction des coûts des composants du système.

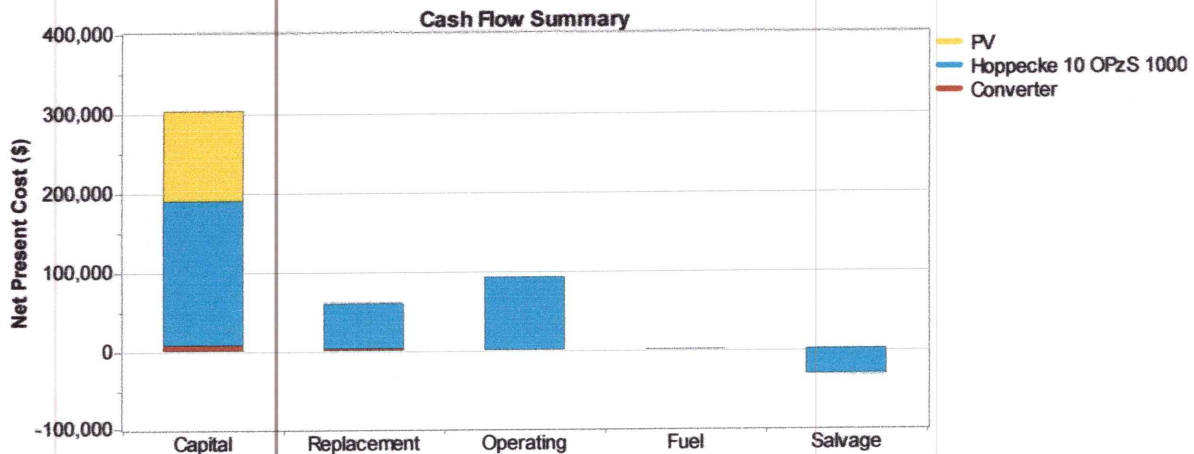


Figure IV.13: Coût net actuel du système PV autonome en fonction des différents coûts de cycle de vie.

IV.3.3. Système éolien autonome

L'architecture du système éolienne autonome est représentée par la figure (IV.14), il est constitué d'un générateur éolien qui représente la source principale d'énergie, des batteries électrochimiques pour le stockage d'énergie, d'un bus AC auquel est connectée la charge électrique et relié le générateur éolien et d'un bus DC relié au système de stockage. Les deux bus AC et DC sont connectés via un convertisseur.

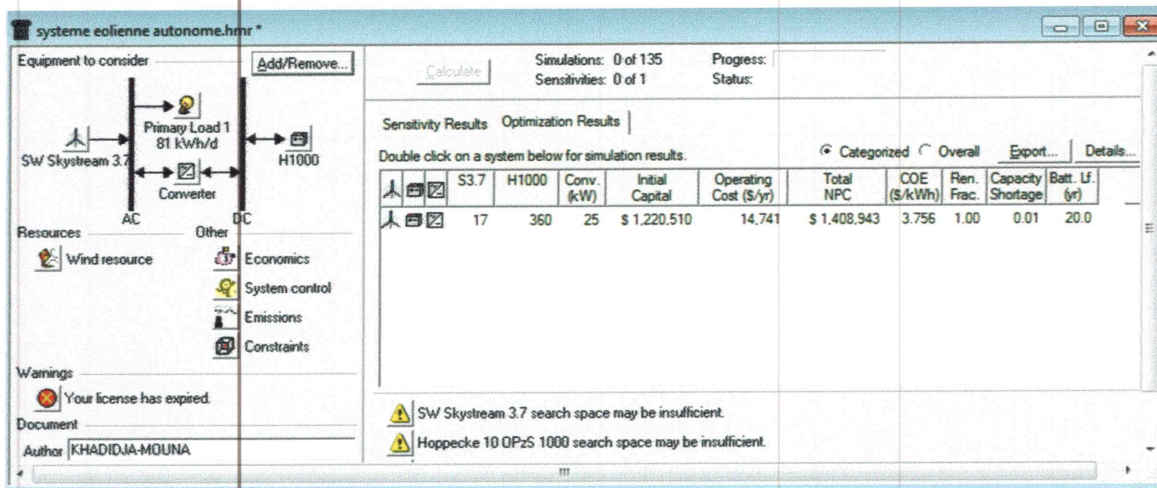


Figure IV.14: Architecture du système éolien autonome.

Les résultats de simulation optimisés sont représentés par la figure (IV.14). La configuration optimale du système éolien autonome, représentée par le tableau (IV.9), est constitué de 17 éolien d'une puissance nominal de 1.8KW, un système de stockage d'une

capacité nominale de 360KWh, un convertisseur bi-directionnel d'une puissance nominale de 25KW.

Tableau IV.9: Composants du système éolien autonome.

Composant	Eolienne	Batterie	Convertisseur
Taille	30.6 kw	360 kwh	25 kw

Le système produit annuellement 49395KWh d'énergie électrique avec seulement 11631 KWh produite en excès qui est équivalente à 23.5%. La proportion de la charge électrique non satisfaite est nulle. La production énergétique annuelle du système éolien est représentée par la figure (IV.15).

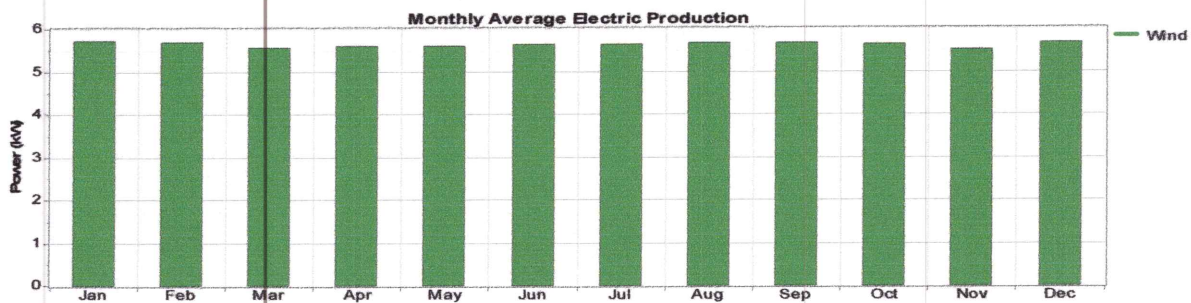


Figure IV.15: Production énergétique mensuelle du système éolien autonome.

L'analyse économique du système énergétique est donnée par le tableau (IV.10) où tous les détails des coûts relatifs à chaque composant du système sont donnés: le coût capital, le coût de remplacement, le coût d'opération et de maintenance, le coût de récupération, ainsi que le NPC du système, et le coût du kilowatt heure d'énergie. La figure (IV.16) représente le coût total net relatif à chaque composant du système énergétique (éolienne, le système de stockage et le convertisseur). La figure (IV.17) représente le coût total net du système en fonction des différents types de coûts. Une analyse des résultats présentés dans le tableau (IV.10), figures (IV.16) et (IV.17), montre que le système éolien autonome nécessite un coût capital initial important dû principalement au coût initial de l'éolienne, le système de stockage affecte le coût de remplacement du système. Egalement, les coûts d'O&M reviennent au système de stockage et au générateur éolien. ce qui a induit un coût de revient d'énergie électrique très élevé (1408943\$).

Tableau IV.10: Caractéristiques économiques du système éolien autonome.

Composant	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	Carburant (\$)	Récupération (\$)	Total (\$)	COE (\$/KWh)
Eolienne	1020000	0	65195	0	0	1085195	3.756
Système de stockage	182160	56798	92040	0	-31832	299166	
Convertisseur	18350	7657	0	0	-1425	24582	
Système	1220510	64455	157235	0	-33257	1408943	

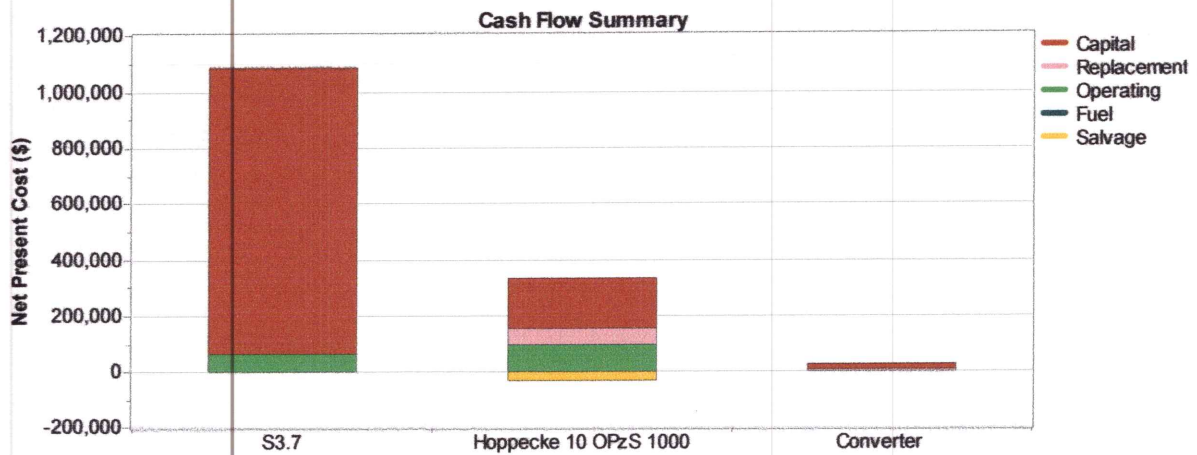


Figure IV.16: Coût net actuel du système éolien autonome en fonction des coûts des composants du système.

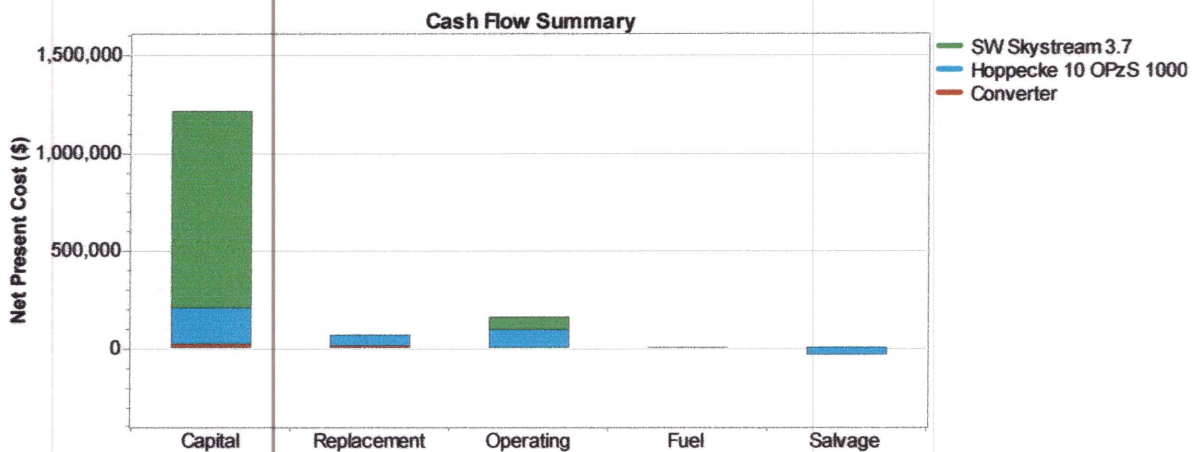


Figure IV.17: Coût net actuel du système éolien autonome en fonction des différents coûts de cycle de vie.

IV.3.4 Systèmes hybrides PV-diesel avec stockage

Les systèmes hybrides étudiés dans cette partie consistent en un système PV fonctionnant en parallèle avec un GD, des batteries pour le stockage d'énergie et des convertisseurs de puissance.

L'architecture du système hybride est représentée par la figure (IV.18). La configuration optimale est constituée d'un champ PV d'une puissance crête de 5KW, un générateur diesel d'une puissance nominale de 5KW, un convertisseur de puissance d'une puissance nominale égale à 10KW et un banc de stockage d'une capacité nominale égale à 42KWh.

L'énergie électrique produite par le système hybride annuellement est représentée par la figure (IV.19). Le système produit 30668 KWh/an d'électricité dont 11709KWh est produite par le champ PV et 18959KWh par le générateur diesel. Les caractéristiques techniques et énergétiques du système sont représentées par le tableau (IV.11).

La puissance de sortie du champ PV est représentée par la figure(IV.20). La figure (IV.21) représente la puissance générée par le générateur diesel. La figure (IV.22) représente l'état de charge de la batterie. On remarque que le GD fonctionne pendant la journée en mode complémentaire avec le système PV. Durant la nuit la quantité d'énergie demandée par la charge est assurée par les batteries. Lorsque la quantité de l'énergie stockée dans les batteries n'est pas suffisante le GD prend la relève pour assurer le déficit d'énergie.

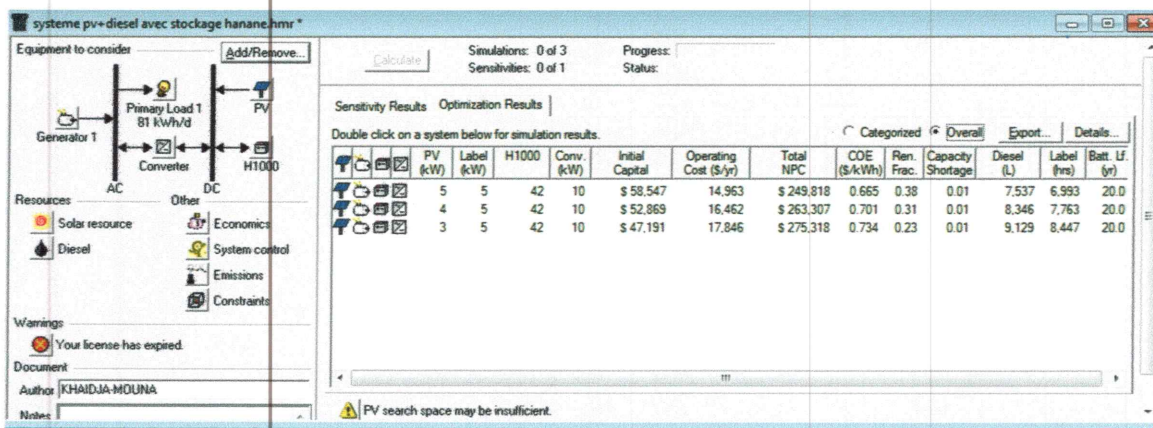


Figure IV.18: Architecture du système hybride 38%PV-diesel-batterie.

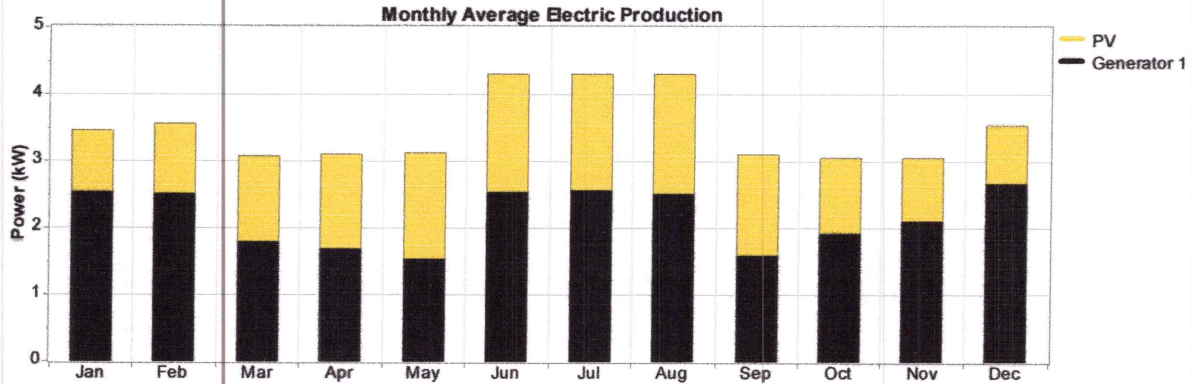


Figure IV.19: Production énergétique mensuelle du système hybride 38%PV-diesel-batterie.

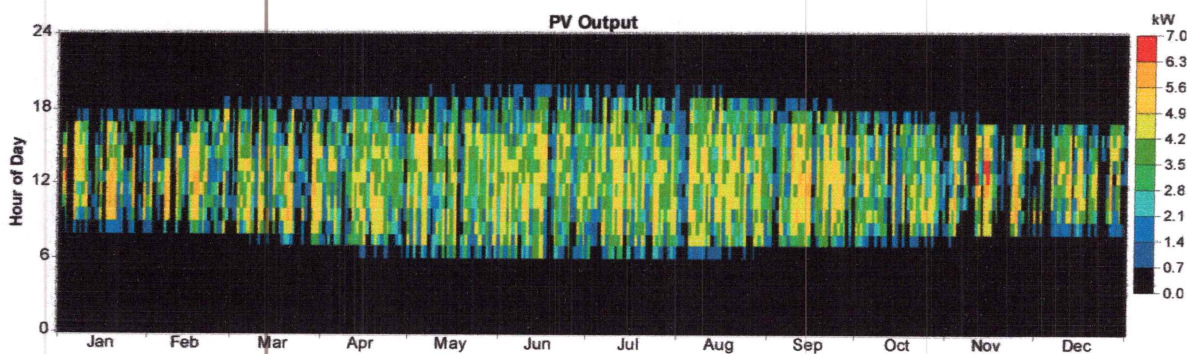


Figure IV.20: Production annuelle du système PV.

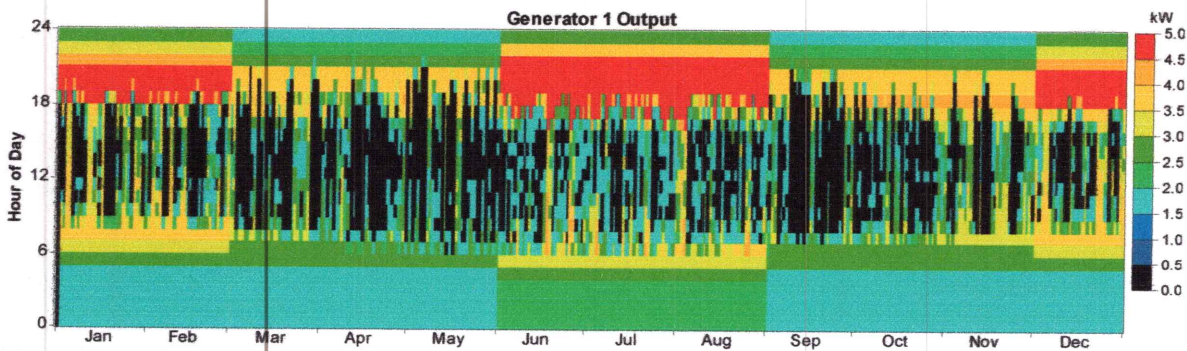


Figure IV.21: Production annuelle du générateur diesel.

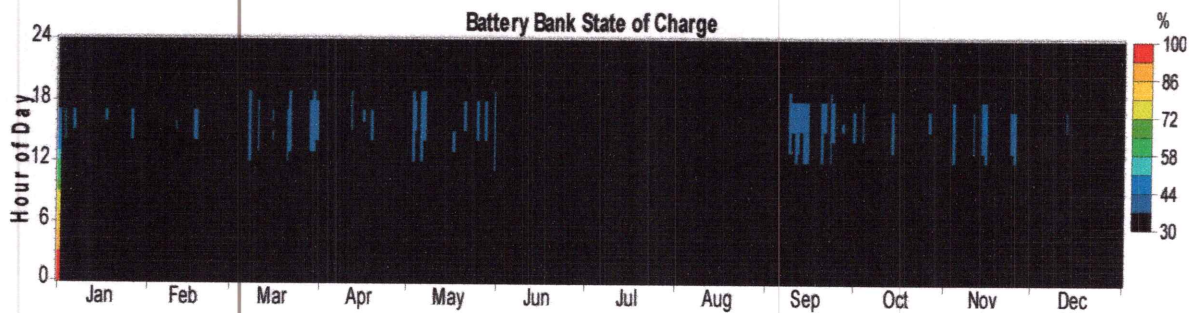


Figure IV.22: Etat de charge annuel du système de stockage.

Tableau IV.11 : Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique.

Composant	Taille KW	Production KWh	Consommation KWh	Excès KWh (%)	Consommation de carburant (L/an)
Champ PV	5	11709	29385	0.853%	-----
GD	5	18959			7537
Batteries	42	-----			-----
Convertisseur	10	-----			-----
Système		30668			7537

L'analyse économique du système est donnée par le tableau (IV.12), le coût net actuel du système est estimé être égal à 249818\$. Le système génère de l'énergie électrique avec un coût de revient égal à 0.665\$/KWh.

Sur la figure (IV.23), est représentée la répartition du coût net actuel du système en fonction des différents composants du système énergétique. La figure (IV.24) représente le coût net actualisé en fonction des différents coûts du système qui sont le coût capital, le coût de remplacement, le coût d'O&M, le coût du carburant ainsi que le coût récupéré à la fin de vie du projet.

D'après les résultats présentés dans le tableau (IV.12) et la figure (IV.23), On remarque que les coûts initiaux des modules PV et du système de stockage sont les composantes importantes du coût capital initial du système. La deuxième composante importante est le coût de consommation de carburant. Ces coûts ont une grande influence sur le coût actuel net du système et le coût de revient d'énergie.

Tableau IV.12 : Caractéristiques économiques du système énergétique.

Composant	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	Carburant (\$)	Récupéré (\$)	Total (\$)	COE (\$/KWh)
Champ PV	28390	0	0	0	0	28390	0.665
GD	1565	8783	89394	77077	-126	176693	
Batteries	21252	6626	10738	0	-3714	34903	
Convertisseur	7340	3063	0	0	-570	9833	
Système	58547	18472	100132	77077	-4410	249818	

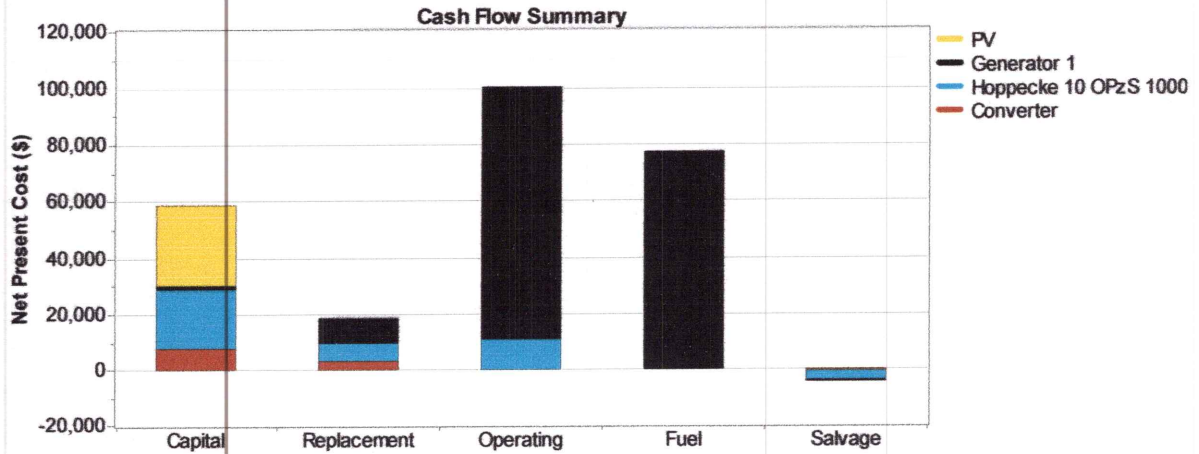


Figure IV.23: Coût net actuel du système 38%PV-diesel-batterie en fonction des différents coûts de cycle de vie.

Dans ce système comme le représente la figure (IV.24), le générateur diesel est le composant le plus coûteux sur la durée de vie de projet bien que son coût capital initial et son coût de remplacement ne sont pas vraiment élevés en comparaison avec le champ PV et le système de stockage, ceci peut être interprété par à la consommation importante de carburant (53.15% du coût total du système diesel) .

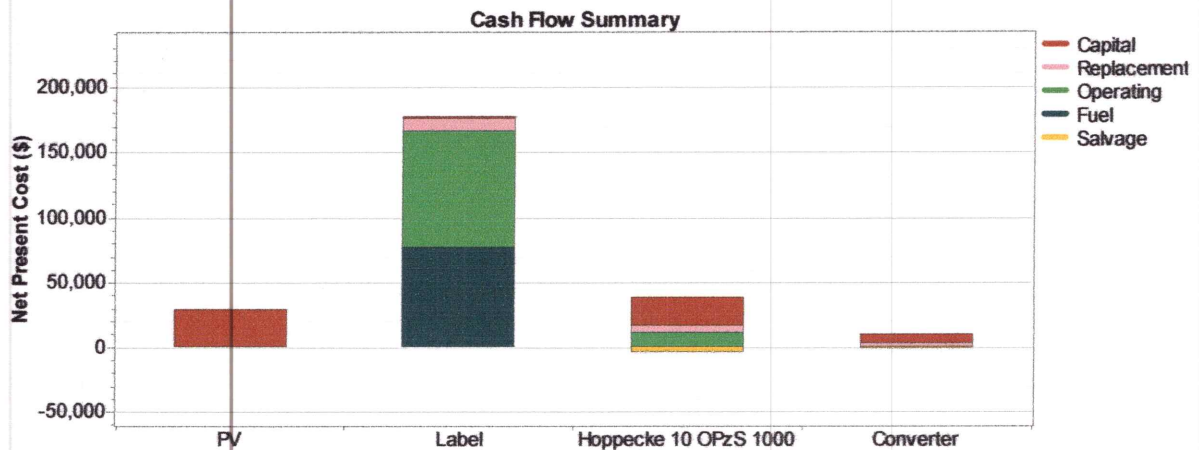


Figure IV.24: Coût net actuel du système 38%PV-diesel-batterie en fonction des coûts des composants du système.

Tableau IV.13: Emissions du système d'énergie hybride.

Polluants	Dioxyde de Carbone	Monoxyde de carbone	Les hydrocarbures non-brulées	Matières Particulaires	Dioxyde de soufre	oxydes d'azote
Emissions (Kg/An)	19847	49	5.43	3.17	39.9	437

La quantité totale des polluants émis annuellement est estimée égale à 20381.5 Kg/an, tableau (IV.13).

IV.3.5 Système hybride PV-diesel sans stockage

Les systèmes hybrides étudiés dans cette partie consistent en un système PV fonctionnant en parallèle avec un GD et des convertisseurs de puissance.

L'architecture du système hybride est représentée par la figure (IV.25). La configuration optimale est constituée d'un champ PV d'une puissance crête de 5KW, un générateur diesel d'une puissance nominale de 5KW, un convertisseur de puissance d'une puissance nominale égale à 10KW.

L'énergie électrique produite par le système hybride annuellement est représentée par la figure (IV.26). Le système produit 32286KWh/an d'électricité dont 11709KWh est produite par le champ PV et 20577KWh par le générateur diesel. Les caractéristiques techniques et énergétiques du système sont représentées par le tableau (IV.14).

La puissance de sortie du champ PV est représentée par la figure (IV.27). La figure (IV.28) représente la puissance générée par le générateur diesel. On remarque que le GD fonctionne pendant la journée en mode complémentaire avec le système PV. Durant la nuit la quantité d'énergie demandée par la charge est assurée par le GD.

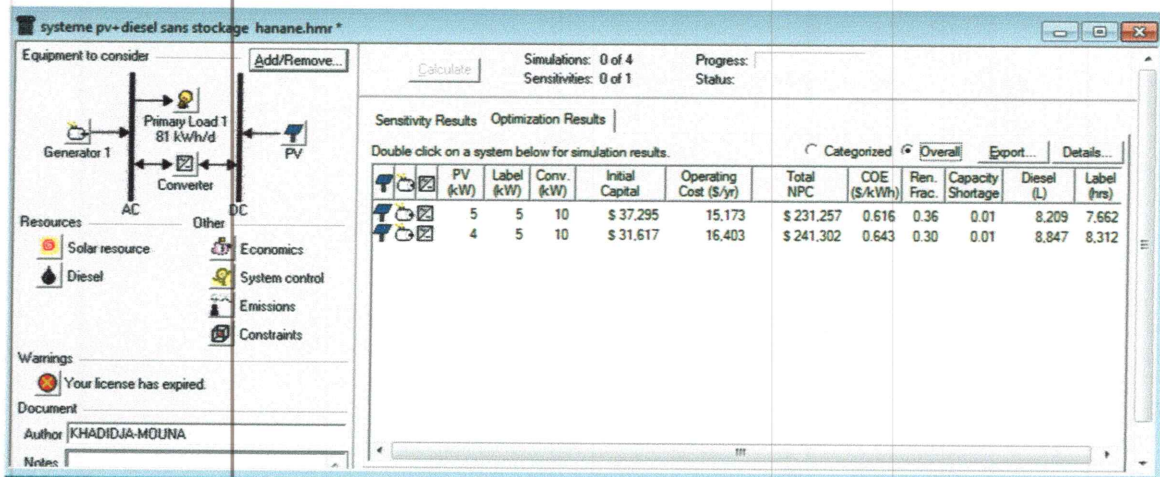


Figure IV.25: Architecture du système hybride 36%PV-diesel.

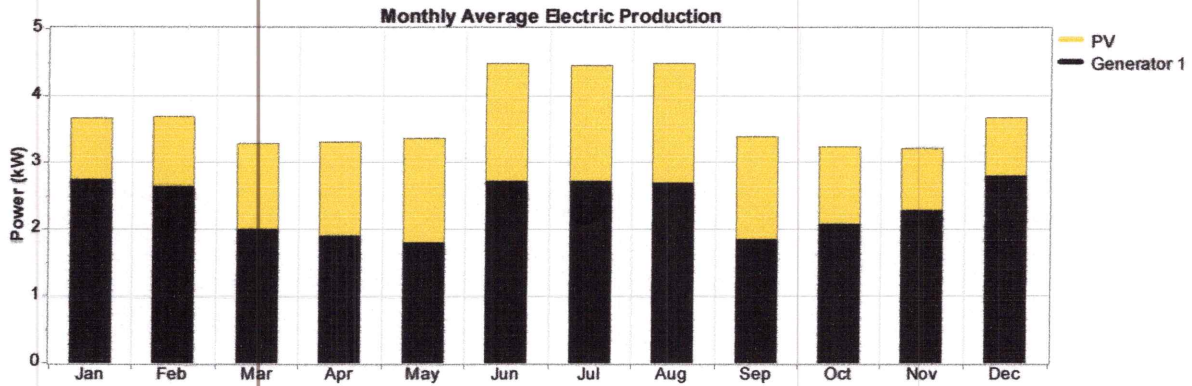


Figure IV.26: Production énergétique mensuelle du système hybride 36%PV-diesel.

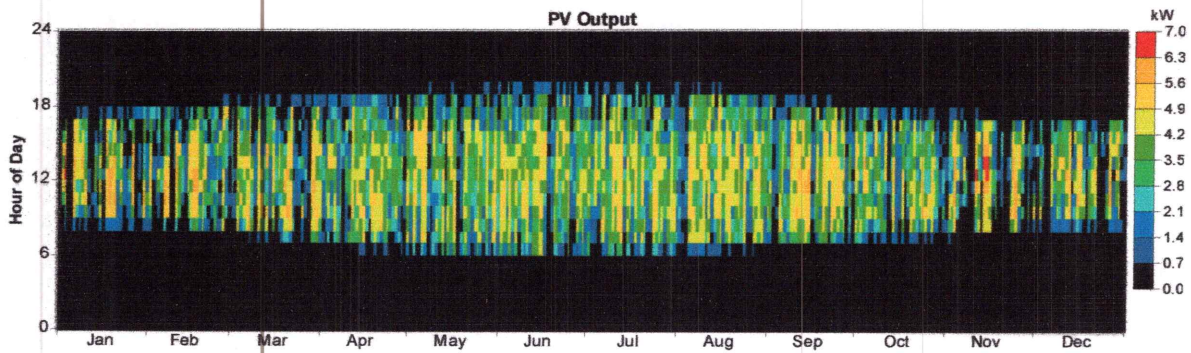


Figure IV.27: Production annuelle du système PV.

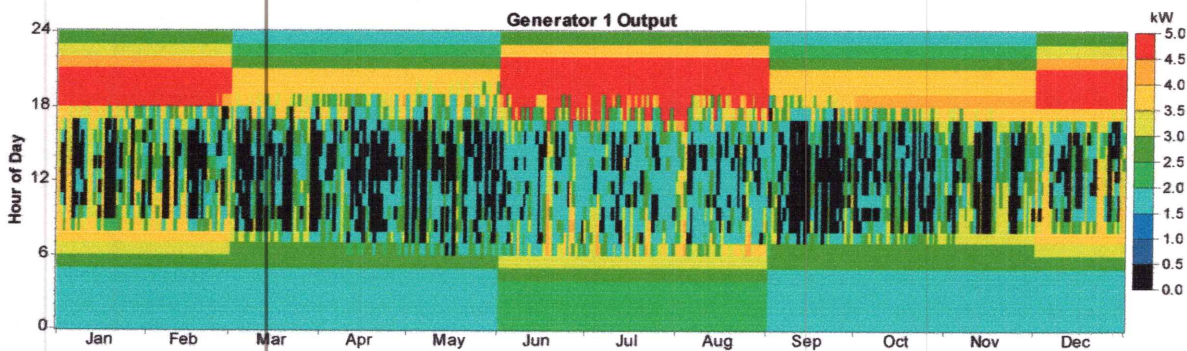


Figure IV.28: Production annuelle du générateur diesel.

Tableau IV.14 : Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique.

Composant	Taille KW	Production KWh	Consommation KWh	Excès KWh (%)	Consommation carburant (L/an)
Champ PV	5	11709	29384	596	8209
GD	5	20577			
Convertisseur	10	-----			
Systeme		32286			

L'analyse économique du système est donnée par le tableau (IV.15), le coût net actuel du système est estimé être égal à 231257\$. Le système génère de l'énergie électrique avec un coût de revient égal à 0.616\$/KWh.

Sur la figure (IV.29), est représentée la répartition du coût net actuel du système en fonction des différents composants du système énergétique. La figure (IV.30) représente le coût net actualisé en fonction des différents coûts du système qui sont le coût capital, le coût de remplacement, le coût d'O&M, le coût du carburant ainsi que le coût récupéré à la fin de vie du projet.

D'après les résultats présentés dans le tableau (IV.15) et la figure (IV.29), On remarque que les coûts initiaux des modules PV sont les composantes importantes du coût capital initial du système. La deuxième composante importante est le coût d'opération suivi par le coût de consommation de carburant. Ces coûts ont une grande influence sur le coût actuel net du système et le coût de revient d'énergie.

Tableau IV.15: Caractéristiques économiques du système énergétique.

Composant	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	Carburant (\$)	Récupéré (\$)	Total (\$)	COE (\$/KWh)
Champ PV	28,390	0	0	0	0	28,390	0.616
GD	1,565	9,657	97,946	83,950	-84	193,034	
Convertisseur	7,340	3,063	0	0	-570	9,833	
Système	37,295	12,720	97,946	83,950	-654	231,257	

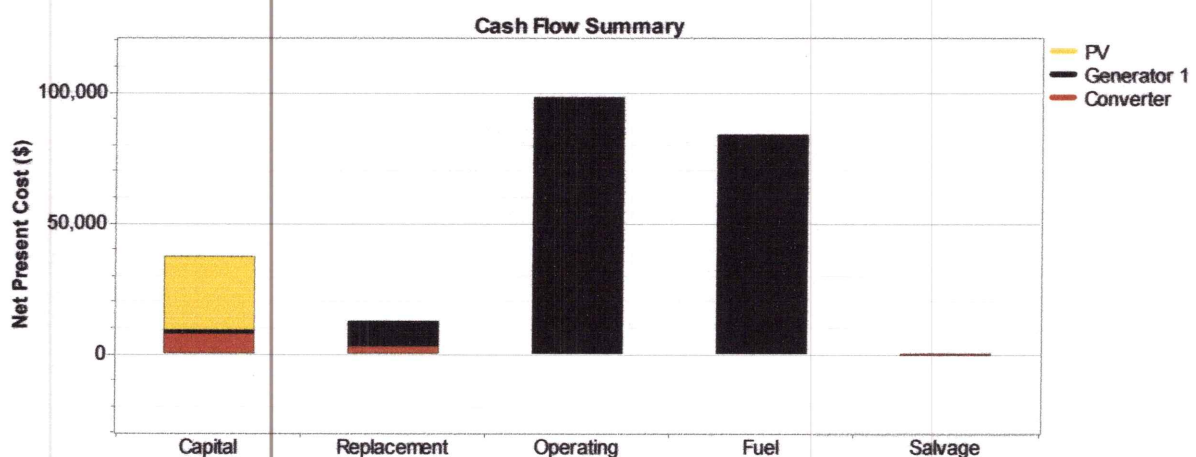


Figure IV.29: Coût net actuel du système 36%PV-diesel en fonction des différents coûts de cycle de vie.

Dans ce système comme le représente la figure (IV.30), le générateur diesel est le composant le plus coûteux sur la durée de vie de projet bien que son coût capital initial et son coût de remplacement ne sont pas vraiment élevés en comparaison avec le champ PV, ceci peut être interprété par la consommation importante de carburant (53.15% du coût total du système diesel).

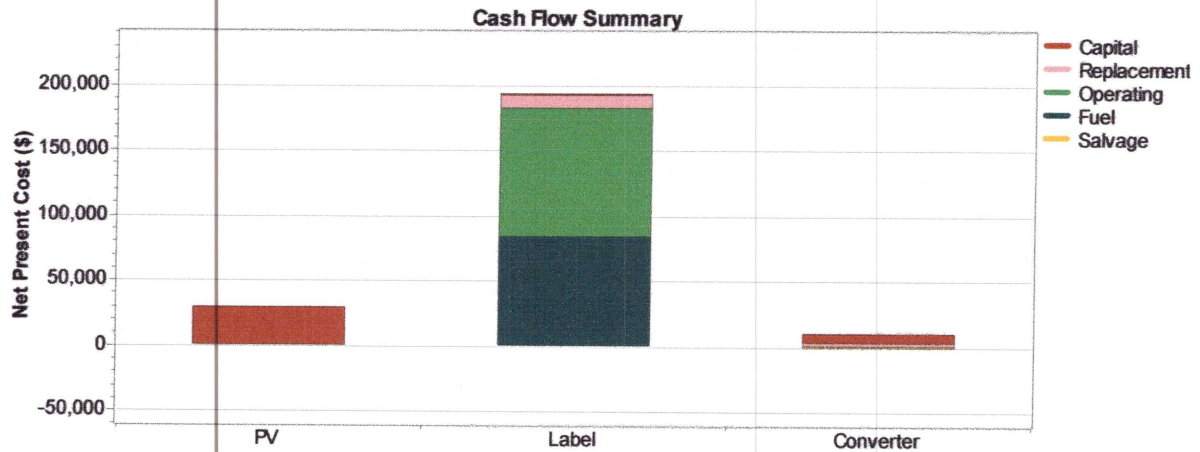


Figure IV.30: Coût net actuel du système 36% PV-diesel en fonction des coûts des composants du système.

Tableau IV.16: Emissions du système d'énergie hybride

Polluants	Dioxyde de Carbone	Monoxyde de carbone	Les hydrocarbures non-brulés	Matières Particulaires	Dioxyde de soufre	oxydes d'azote
Emissions (Kg/An)	21617	53.4	5.91	3.45	43.4	476

La quantité totale des polluants émis annuellement est estimée égale à 22199.16 Kg/an.

IV.3.6. Système hybride éolien-diesel avec stockage

Les systèmes hybrides étudiés dans cette partie consistent en un système éolien fonctionnant en parallèle avec un GD, des batteries pour le stockage d'énergie et des convertisseurs de puissance.

L'architecture du système hybride est représentée par la figure (IV.31). La configuration optimale est constituée de 5 générateurs éoliens d'une puissance nominale de 1.8KW, un générateur diesel d'une puissance nominale de 5KW, un convertisseur de puissance d'une puissance nominale égale à 10KW et un banc de stockage d'une capacité nominale égale à 42KWh.

L'énergie électrique produite par le système hybride annuellement est représentée par la figure (IV.32). Le système produit 31392KWh/an d'électricité dont 14528KWh est produite par le générateur éolien et 16864KWh par le générateur diesel. Les caractéristiques techniques et énergétiques du système sont représentées par le tableau (IV.17).

La puissance de sortie du générateur éolien est représentée par la figure (IV.33). La figure (IV.34) représente la puissance générée par le générateur diesel. La figure (IV.35) représente l'état de charge de la batterie. On remarque que le GD fonctionne en mode complémentaire avec le système éolien. Durant l'absence du vent la demande de la charge est assurée par les batteries. Lorsque la quantité de l'énergie stockée dans les batteries n'est pas suffisante le GD prend la relève pour assurer le déficit d'énergie.

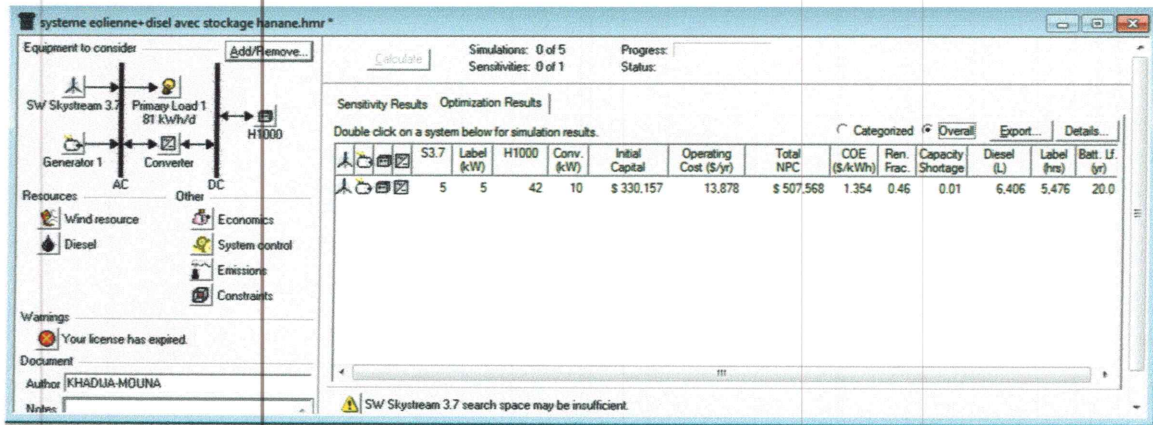


Figure IV.31: Architecture du système hybride 46% éolienne-diesel-batterie.

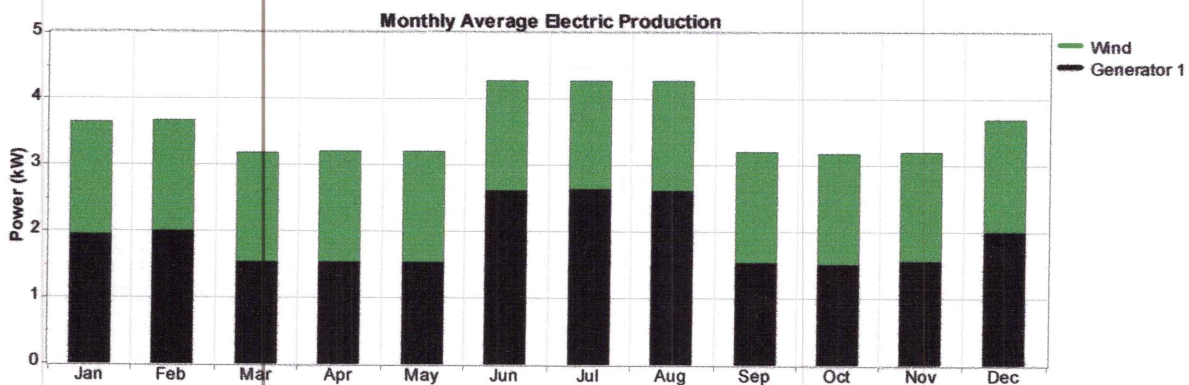


Figure IV.32: Production énergétique mensuelle du système hybride 46% éolien -diesel-batterie.

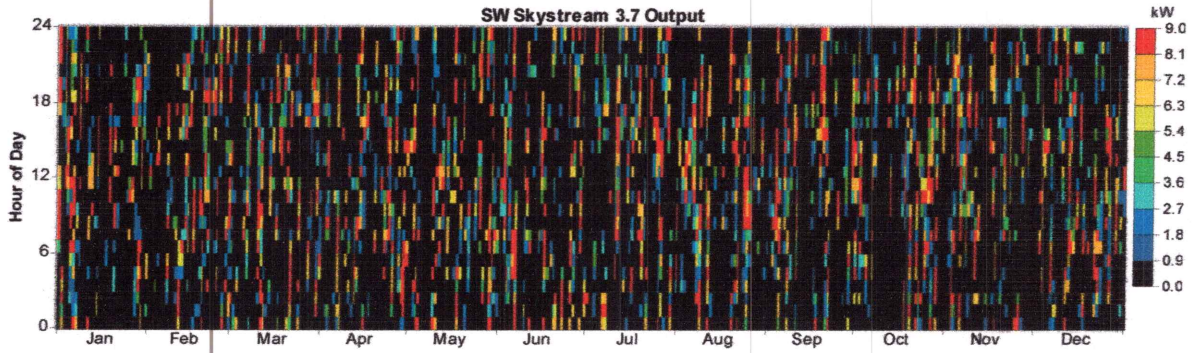


Figure IV.33: Production annuelle du système éolien.

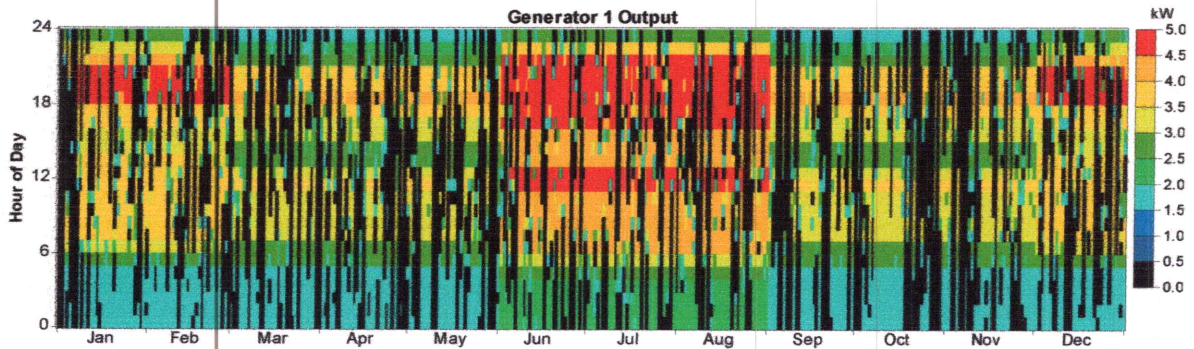


Figure IV.34: Production annuelle du générateur diesel.

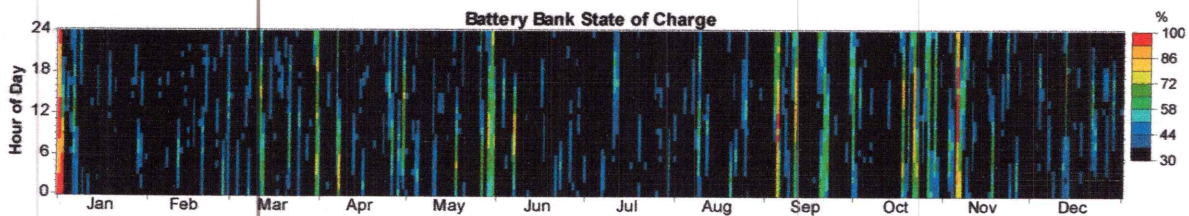


Figure IV.35: Etat de charge annuel du système de stockage.

Tableau IV.17: Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique.

Composant	Taille KW	Production KWh	Consommation KWh	Excès KWh (%)	Consommation carburant (L/an)
Eolienne	9	14528	29328	0.16%	-----
GD	5	16864			6406
Batteries	42	-----			-----
Convertisseur	10	-----			-----
Système		31392			6406

L'analyse économique du système est donnée par le tableau (IV.18), le coût net actuel du système est estimé être égal à 507568\$. Le système génère de l'énergie électrique avec un coût de revient égal à 1.354 \$/KWh.

Sur la figure (IV.36), est représentée la répartition du coût net actuel du système en fonction des différents composants du système énergétique. La figure (IV.37) représente le

coût net actualisé en fonction des différents coûts du système qui sont le coût capital, le coût de remplacement, le coût d'O&M, le coût du carburant ainsi que le coût récupéré à la fin de vie du projet.

D'après les résultats présentés dans le tableau (IV.18) et la figure (IV.36), On remarque que le coût initial du générateur éolien est la composante la plus importante du coût capital initial du système. La deuxième composante importante est le coût d'opération et de maintenance suivi par le coût de consommation de carburant. Ces coûts ont une grande influence sur le coût actuel net du système et le coût de revient d'énergie.

Tableau IV.18: Caractéristiques économiques du système énergétique.

Composant	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	Carburant (\$)	Récupéré (\$)	Total (\$)	COE (\$/KWh)
Eolienne	300000	0	19175	0	0	319175	1.354
GD	1565	6893	70002	65516	-318	143657	
Batteries	21252	6626	10738	0	-3,714	34903	
Convertisseur	7340	3063	0	0	-570	833	
Système	330157	16582	99915	65516	-4,602		

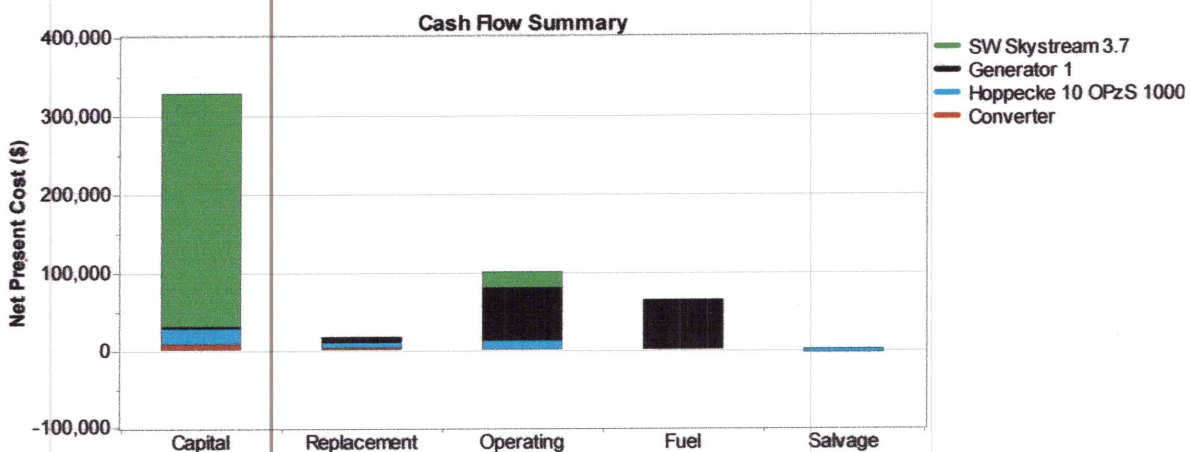


Figure IV.36: Coût net actuel du système 46%éolien-diesel-batterie en fonction des différents coûts de cycle de vie

Dans ce système comme le représente la figure (IV.37), le générateur éolien est le composant le plus coûteux sur la durée de vie de projet bien que son coût capital initial est vraiment élevé en comparaison avec la consommation importante de carburant et le système de stockage.

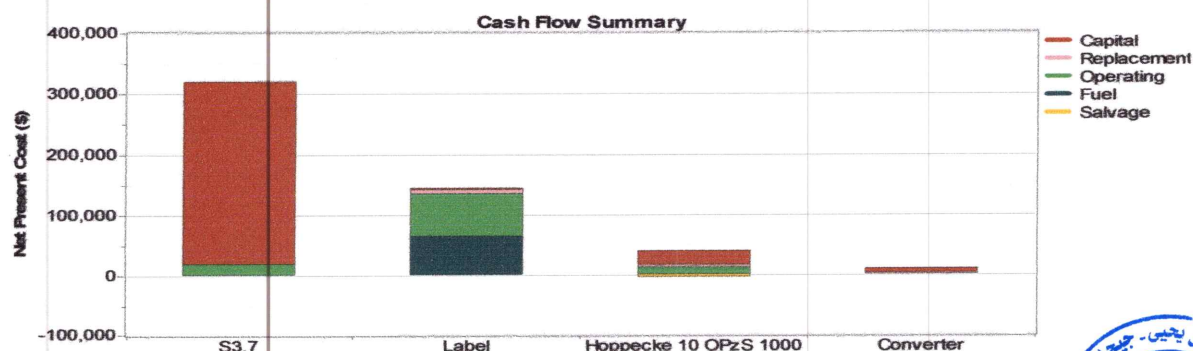


Figure IV.37: Coût net actuel du système 46%éolienne-diesel-batterie en fonction des coûts des composants du système.



Tableau IV.19: Emissions du système d'énergie hybride

Polluants	Dioxyde de Carbone	Monoxyde de carbone	Les hydrocarbures non-brulés	Matières particulaires	Dioxyde de soufre	oxydes d'azote
Emissions (Kg/An)	16870	41.6	4.61	2.69	33.9	372

La quantité totale des polluants émis annuellement est égale à 17324.8 Kg/an, tableau (IV.19).

IV.3.7.Systèmes hybrides éolien-diesel sans stockage

Ce système consiste en un système éolien fonctionnant en parallèle avec un GD, et des convertisseurs de puissance. L'architecture du système hybride est représentée par la figure (IV.38). La configuration optimale est constituée de 3 générateurs éoliens d'une puissance nominale de 1.8KW, un générateur diesel d'une puissance nominale de 6KW, et d'un convertisseur de puissance d'une puissance nominale égale à 10KW.

L'énergie électrique produite par le système hybride annuellement est représentée par la figure (IV.39). Le système produit 32,232 kWh/an d'électricité dont 8,717 kWh est produite par le générateur éolien et 23.516 kWh par le générateur diesel. Les caractéristiques techniques et énergétiques du système sont représentées par le tableau (IV.20).

La puissance de sortie du générateur éolien est représentée par la figure (IV.40). La figure (IV.41) représente la puissance générée par le générateur diesel. On remarque que le GD fonctionne en mode complémentaire avec le système éolien. Durant l'absence de vent la quantité d'énergie demandée par la charge est assurée par le GD.

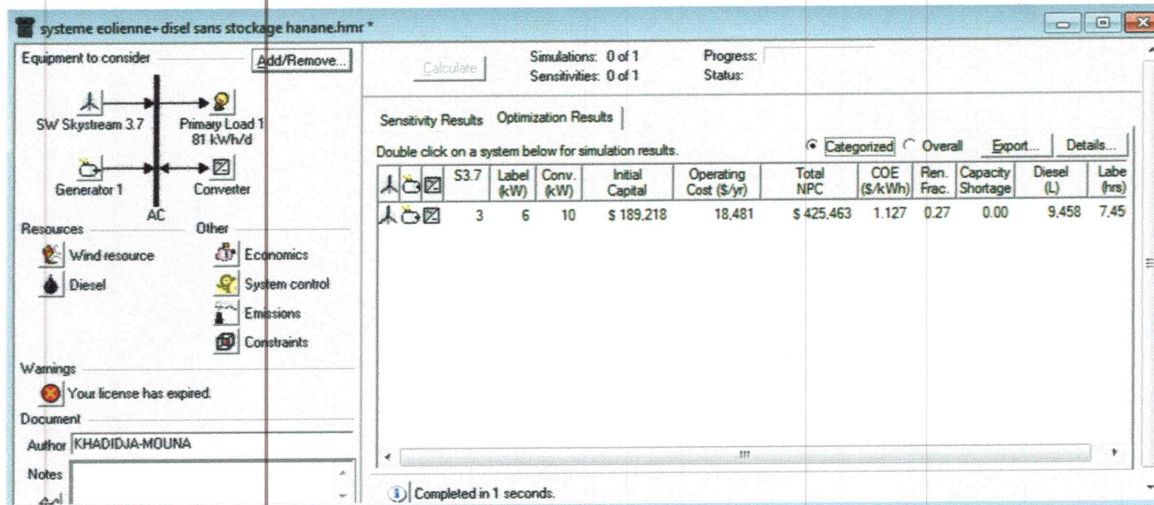


Figure IV.38: Architecture du système hybride 27% éolien-diesel

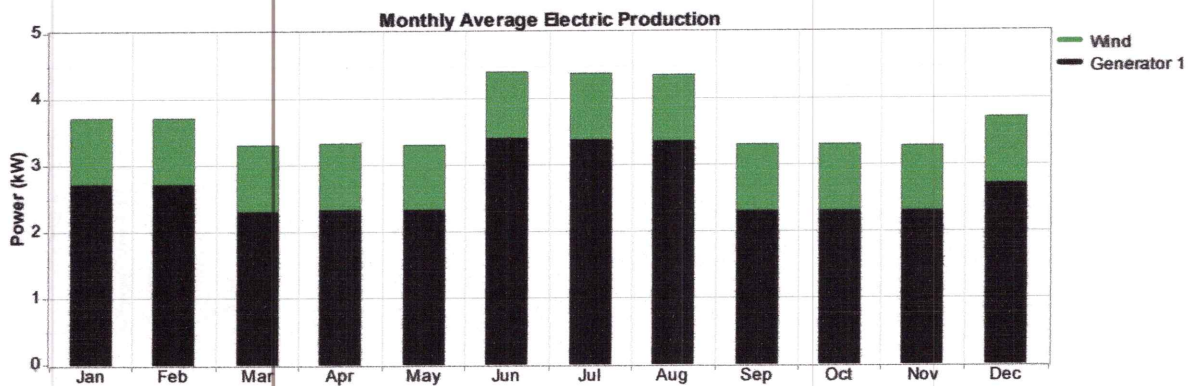


Figure IV.39: Production énergétique mensuelle du système hybride 27% éolien –diesel.

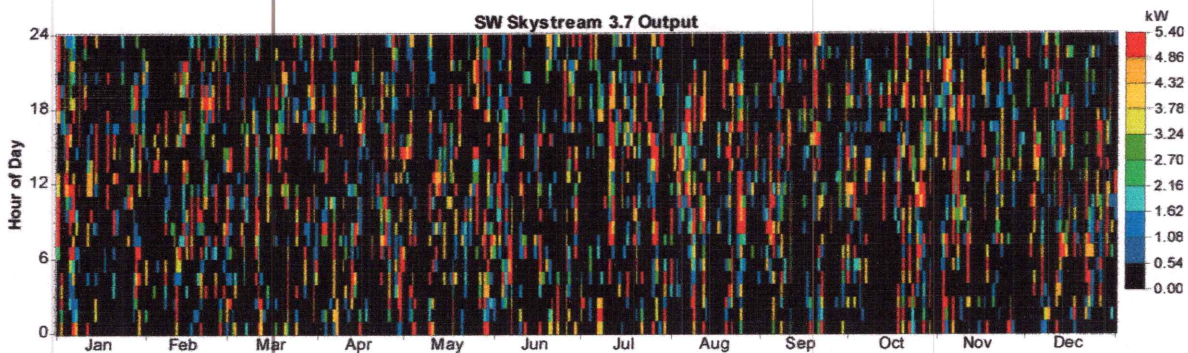


Figure IV.40: Production annuelle du système éolien.

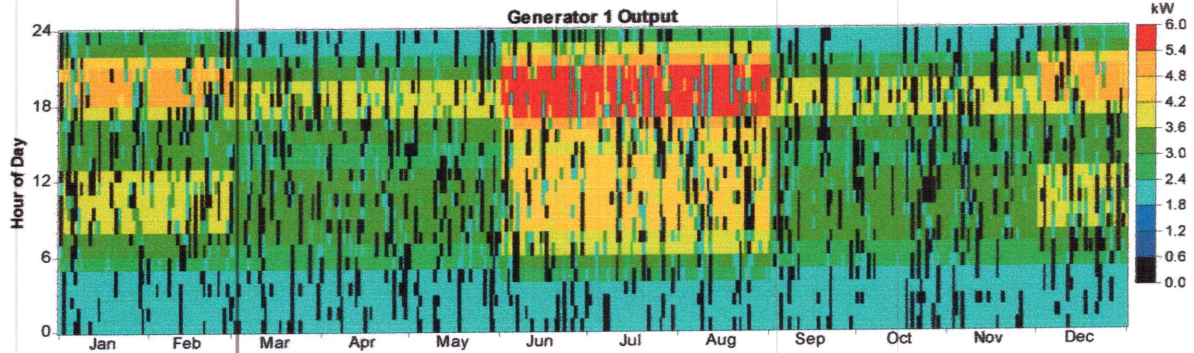


Figure IV.41: Production annuelle du générateur diesel

Tableau IV.20: Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique.

Composant	Taille KW	Production KWh	Consommation KWh	Excès KWh (%)	Consommation carburant (L/an)
Eolienne	5.4	8717	29533	8.37%	-----
GD	6	23516			9458
Convertisseur	10	-----			-----
Système		32232			9458

L'analyse économique du système est donnée par le tableau (IV.21), le coût net actuel du système est estimé être égal à 425463\$. Le système génère de l'énergie électrique avec un coût de revient égal à 1.127 \$/KWh.

Sur la figure (IV.42), est représentée la répartition du coût net actuel du système en fonction des différents composants du système énergétique. La figure (IV.43) représente le coût net actualisé en fonction des différents coûts du système qui sont le coût capital, le coût de remplacement, le coût d'O&M, le coût du carburant ainsi que le coût récupéré à la fin de vie du projet. D'après les résultats présentés dans le tableau (IV.21) et la figure (IV.42), On remarque que les coûts initiaux des générateurs éoliens sont très importants pour le coût capital initial du système. La deuxième composante importante est le coût de consommation de carburant. Ces coûts ont une grande influence sur le coût actuel net du système et le coût de revient d'énergie.

Tableau IV.21: Caractéristiques économiques du système énergétique.

Composant	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	Carburant (\$)	Récupéré (\$)	Total (\$)	COE (\$/KWh)
Eolienne	180000	0	11505	0	0	191505	1.127
GD	1878	11401	14375	96722	-251	224125	
Convertisseur	7340	3063	0	0	-570	9833	
Système	189218	14464	125880	96722	-821		

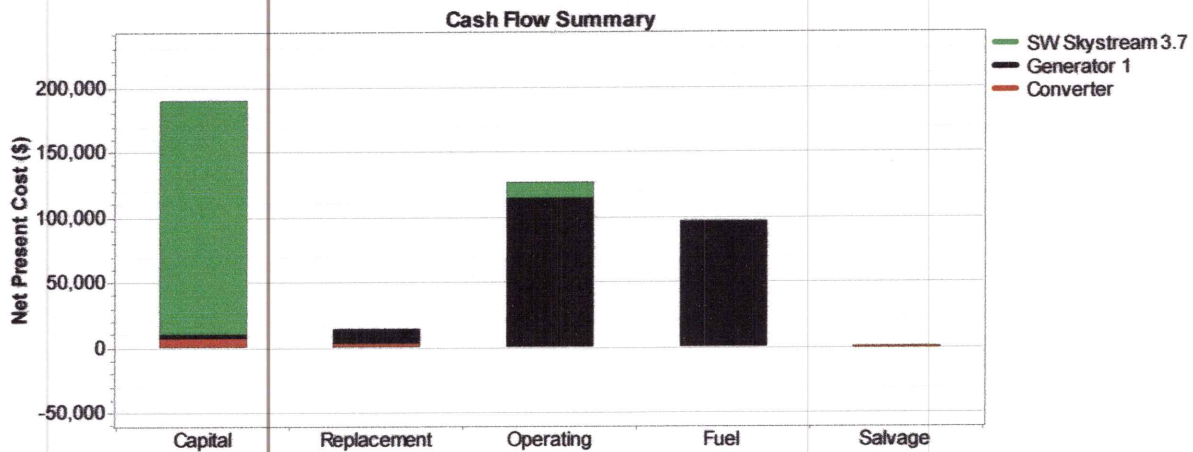


Figure IV.42: Coût net actuel du système 27% éolien-diesel en fonction des différents coûts de cycle de vie.

Dans ce système comme le représente la figure (IV.43), le générateur diesel est le composant le plus coûteux sur la durée de vie de projet bien que son coût capital initial et son coût de remplacement ne sont pas vraiment élevés en comparaison avec le générateur éolien qui possède un coût capital initial important.

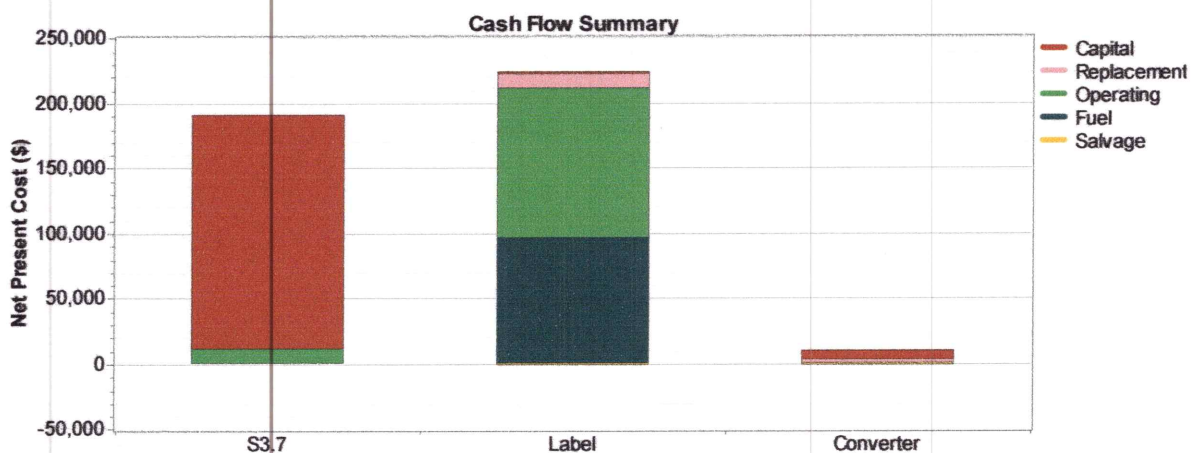


Figure IV.43: Coût net actuel du système 27%éolien-diesel en fonction des coûts des composants du système.

Tableau IV.22: Emissions du système d'énergie hybride

Polluants	Dioxyde de carbone	Monoxyde de carbone	Les hydrocarbures non-brulés	Matières particulaires	dioxyde de soufre	oxydes d'azote
Emissions (Kg/An)	24905	61.5	6.81	3.97	50	549

La quantité totale des polluants émis annuellement est estimée égale à 25576.28 Kg/an, tableau (IV.22).

IV.3.8 Systèmes hybrides PV-éolien avec stockage

Les systèmes hybrides étudiés dans cette partie consistent en un système PV fonctionnant en série avec une éolienne, des batteries pour le stockage d'énergie et des convertisseurs de puissance. L'architecture du système hybride est représentée par la figure (IV.44). La configuration optimale est constituée d'un champ PV d'une puissance crête de 10KW, 7 éoliennes d'une puissance nominale de 1.8KW, un convertisseur de puissance d'une puissance nominale égale à 10KW et un banc de stockage d'une capacité nominale égale à 240KWh.

L'énergie électrique produite par le système hybride annuellement est représentée par la figure (IV.45). Le système produit 43756KWh/an d'électricité dont 23417KWh est produite par le champ PV et 20339KWh par l'éolienne. Les caractéristiques techniques et énergétiques du système sont représentées par le tableau (IV.23).

La puissance de sortie du champ PV est représentée par la figure (IV.46). La figure (IV.47) représente la puissance générée par l'éolienne. La figure (IV.48) représente l'état de charge de la batterie. On remarque que le générateur éolien fonctionne en mode complémentaire avec le système PV. Durant l'absence des ressources renouvelables la quantité d'énergie demandée par la charge est assurée par les batteries.

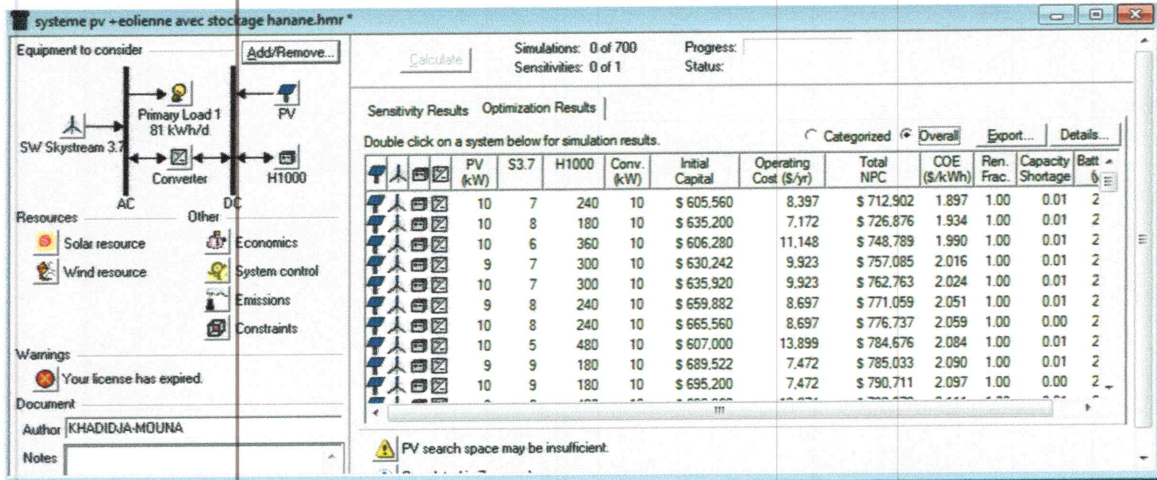


Figure IV.44: Architecture du système hybride 54%PVet 46%éolien-batterie.

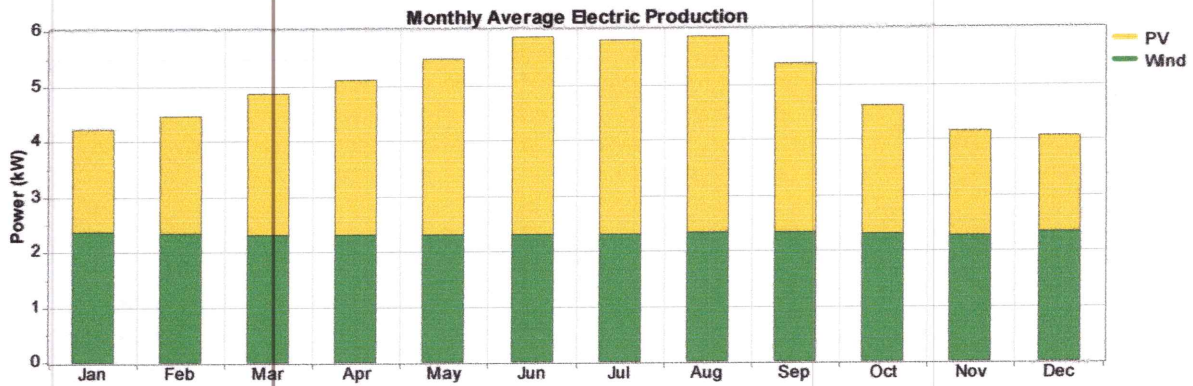


Figure IV.45: Production énergétique mensuelle du système hybride 54%PVet 46%éolien –batterie.

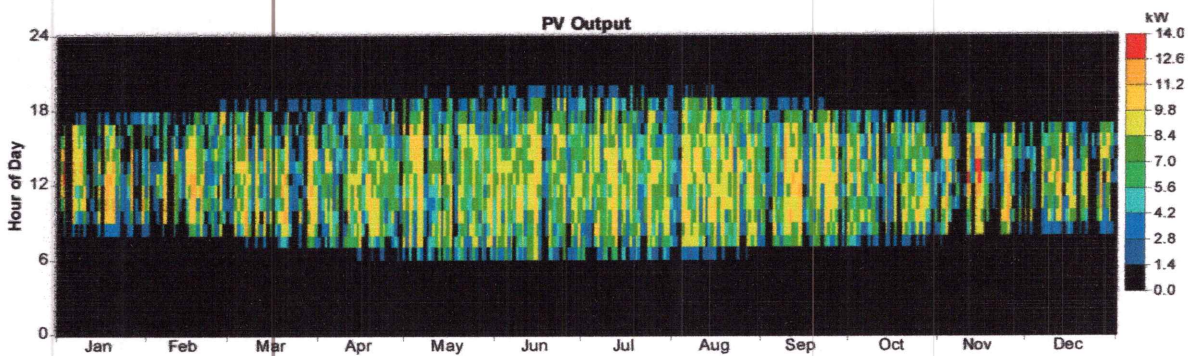


Figure IV.46: Production annuelle du système PV.

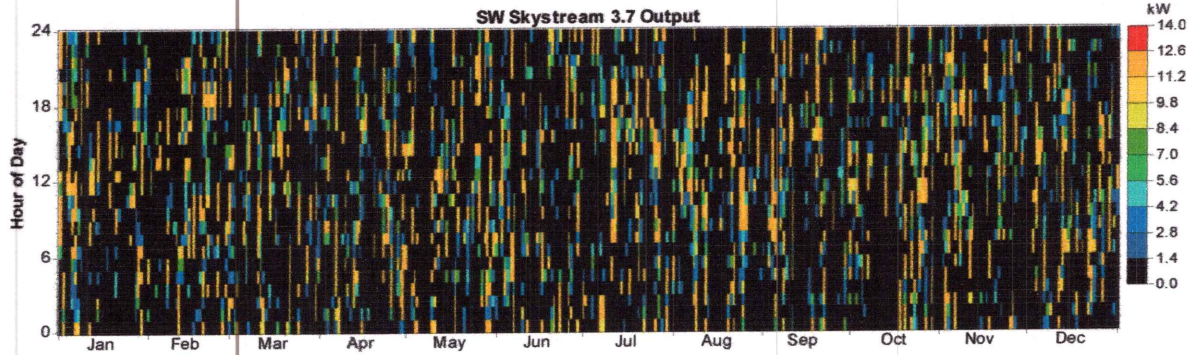


Figure IV.47: Production annuelle de l'éolienne.

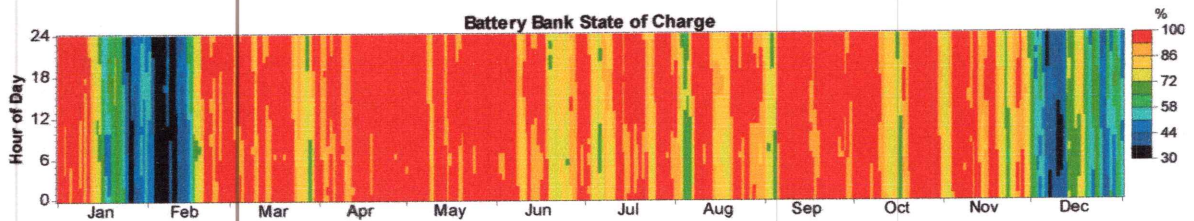


Figure IV.48: Etat de charge annuel du système de stockage.

Tableau IV.23: Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique

Composant	Taille KW	Production KWh	Consommation KWh	Excès KWh (%)
éolienne	12.6	20339	29329	21.6%
Champ PV	10	23417		
Batteries	240	-----		
Convertisseur	10	-----		
Système		43756		

L'analyse économique du système est donnée par le tableau (IV.24), le coût net actuel du système est estimé être égal à 712902\$. Le système génère de l'énergie électrique avec un coût de revient égal à 1.897\$/KWh.

Sur la figure (IV.49), est représentée la répartition du coût net actuel du système en fonction des différents composants du système énergétique. La figure (IV.50) représente le coût net actualisé en fonction des différents coûts du système qui sont le coût capital, le coût de remplacement, le coût d'O&M, le coût du carburant ainsi que le coût récupéré à la fin de vie du projet.

D'après les résultats présentés dans le tableau (IV.24) et la figure (IV.49), On remarque que les coûts initiaux des éoliennes sont les composantes importantes du coût capital initial

du système. La deuxième composante importante est le coût des modules PV et du système de stockage.

Tableau IV.24: Caractéristiques économiques du système énergétique.

Composant	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	Carburant (\$)	Récupéré (\$)	Total (\$)	COE (\$/KWh)
Champ PV	56780	0	0	0	0	56780	1.897
Eolienne	420000	0	26845	0	0	446845	
Batteries	121440	37866	61360	0	-21222	199444	
Convertisseur	7340	3063	0	0	-570	9833	
Système	605560	40928	88205	0	-21792	712902	

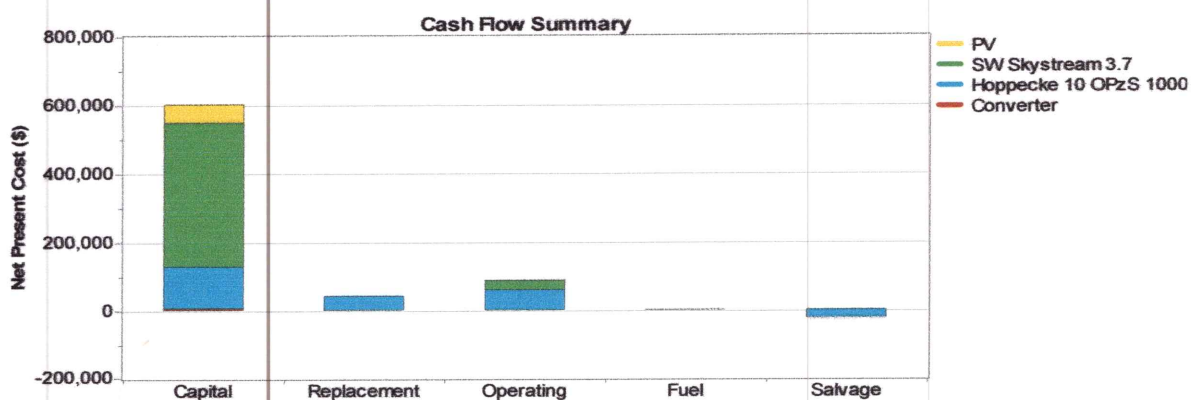


Figure IV.49: Coût net actuel du système 54%PVet 46%éolien-batterie en fonction des différents coûts de cycle de vie.

Dans ce système comme le représente la figure (IV.50), le générateur éolien est le composant le plus coûteux sur la durée de vie de projet bien que son coût initial est vraiment élevé en comparaison avec le champ PV et le système de stockage.

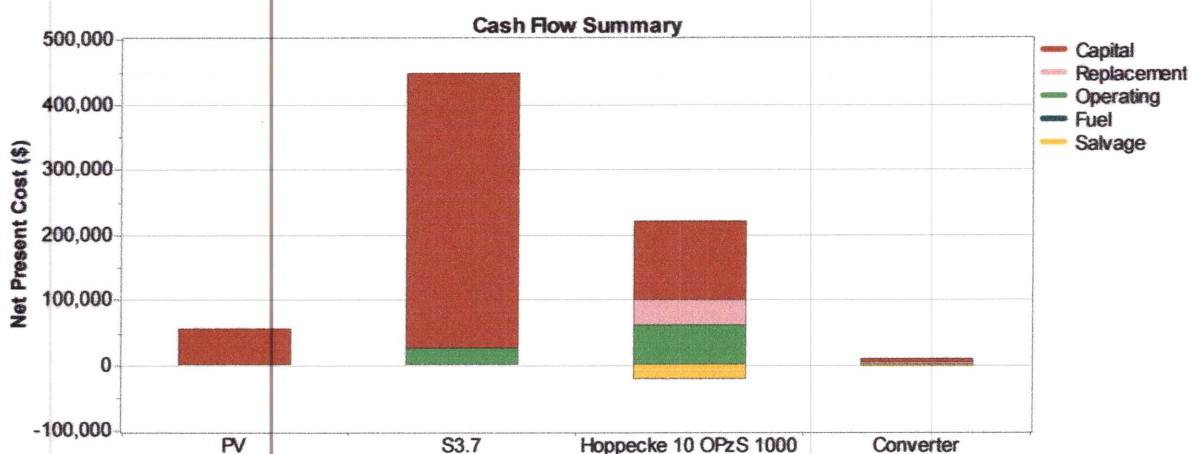


Figure IV.50: Coût net actuel du système 54%PVet46%éolien-batterie en fonction des coûts des composants du système.

Tableau IV.25: Emissions du système d'énergie hybride

Polluants	Dioxyde de Carbone	Monoxyde de Carbone	Les hydrocarbures non-brulés	Matières particulaires	Dioxyde de soufre	oxydes d'azote
Emissions (Kg/An)	0	0	0	0	0	0

La quantité totale des polluants émis annuellement est estimée égale à 0 Kg/an, les énergies renouvelables sont propre, tableau (IV.25).

IV.3.9.Systèmes hybrides PV-éolien-diesel avec stockage

Les systèmes hybrides étudiés dans cette partie consistent en un système PV avec un système éolien fonctionnant en parallèle avec un GD, des batteries pour le stockage d'énergie et des convertisseurs de puissance. L'architecture du système hybride est représentée par la figure (IV.51). La configuration optimale est constituée d'un champ PV d'une puissance crête de 10KW, un générateur éolien de puissance nominale de 1.8 kw, un générateur diesel d'une puissance nominale de 5KW, un convertisseur de puissance d'une puissance nominale égale à 10KW et un banc de stockage d'une capacité nominale égale à 42KWh.

L'énergie électrique produite par le système hybride annuellement est représentée par la figure (IV.52). Le système produit 33820KWh/an d'électricité dont 23417KWh est produite par le champ PV, 2906KWh est produit par l'éolienne et 7497KWh par le générateur diesel. Les caractéristiques techniques et énergétiques du système sont représentées par le tableau (IV.26).

La puissance de sortie du champ PV est représentée par la figure (IV.53). La figure (IV.54) représente la puissance générée par le générateur diesel. La figure (IV.55) représente l'état de charge de la batterie. La figure (IV.56) représente la puissance générée par le générateur éolien. On remarque que le GD fonctionne en mode complémentaire avec le système PV et le système éolien. Durant l'absence des ressources renouvelables la quantité d'énergie demandée par la charge est assurée par les batteries. Lorsque la quantité de l'énergie stockée dans les batteries n'est pas suffisante le GD prend la relève pour assurer le déficit d'énergie.

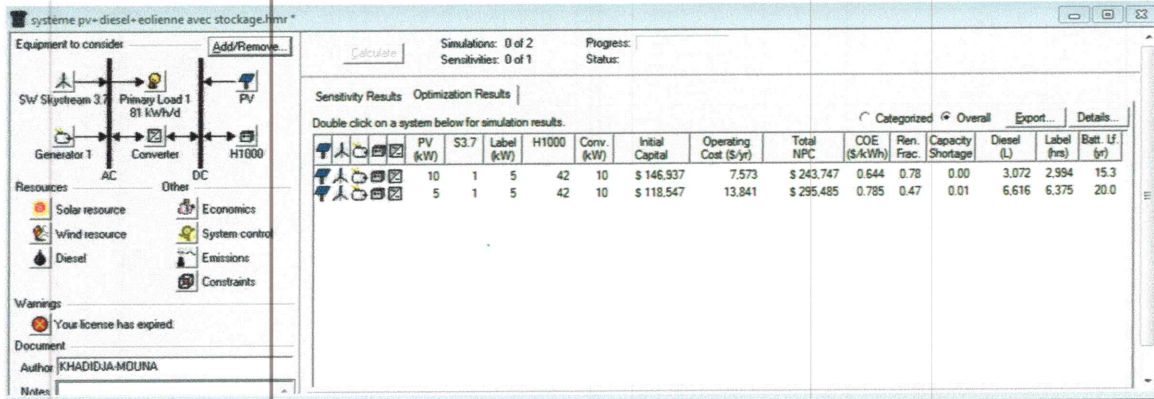


Figure IV.51: Architecture du système hybride 69%PV-9% éolien- diesel-batterie.

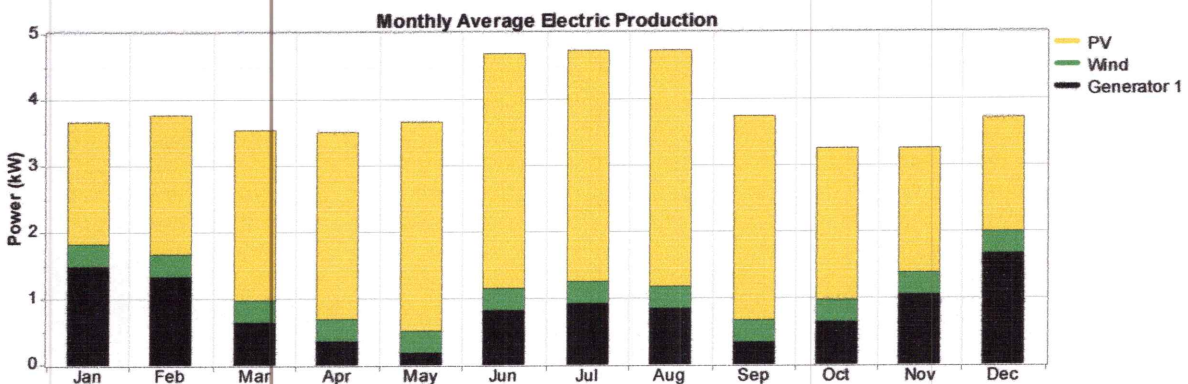


Figure IV.52: Production énergétique mensuelle du système hybride 69%PV-9%éolien-diesel-batterie.

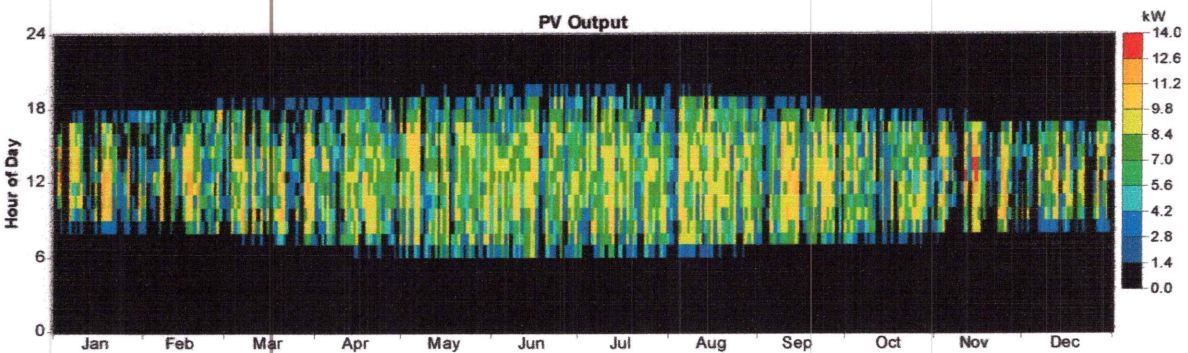


Figure IV.53: Production annuelle du système PV.

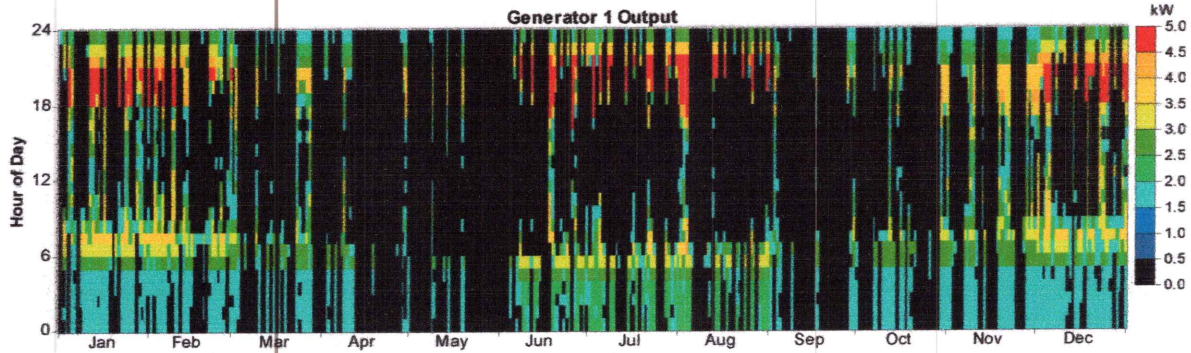


Figure IV.54: Production annuelle du générateur diesel.

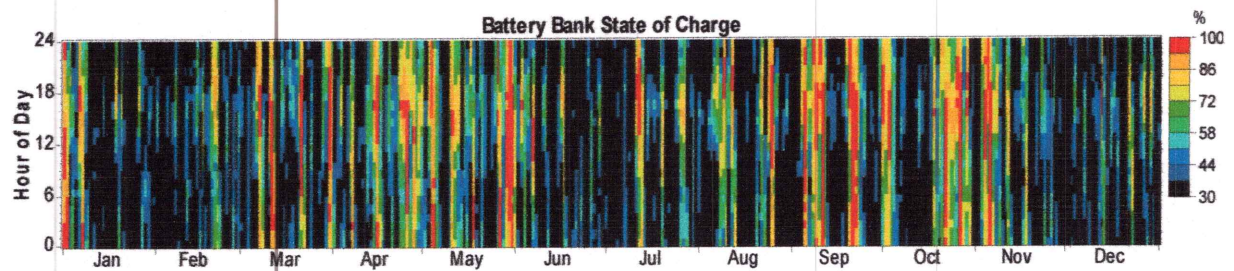


Figure IV.55: Etat de charge annuel du système de stockage.

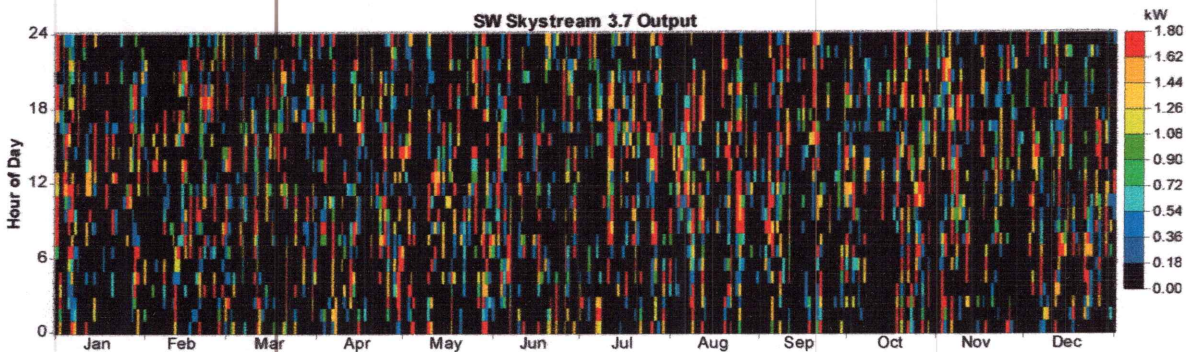


Figure IV.56: Production annuelle du générateur éolien.

Tableau IV.26: Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique.

Composant	Taille KW	Production KWh	Consommation KWh	Excès KWh (%)	Consommation carburant (L/an)
Champ PV	10	23417	29638	2,14	
Eolien	1.8	2906			
GD	5	7497			3072
Batteries	42	-----			
Convertisseur	10	-----			
Systeme		33820			3072

L'analyse économique du système est donnée par le tableau (IV.27), le coût net actuel du système est estimé être égal à 243747\$. Le système génère de l'énergie électrique avec un coût de revient égal à 0.644\$/KWh.

Sur la figure (IV.57), est représentée la répartition du coût net actuel du système en fonction des différents composants du système énergétique. La figure (IV.58) représente le coût net actualisé en fonction des différents coûts du système qui sont le coût capital, le coût de remplacement, le coût d'O&M, le coût du carburant ainsi que le coût récupéré à la fin de vie du projet.

D'après les résultats présentés dans le tableau (IV.27) et la figure (IV.57), On remarque que les coûts initiaux des générateurs éoliens et de champ PV sont les composantes importantes du coût capital initial du système. La deuxième composante importante est le coût de consommation de carburant. Ces coûts ont une grande influence sur le coût actuel net du système et le coût de revient d'énergie.

Tableau IV.27: Caractéristiques économiques du système énergétique.

Composant	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	Carburant (\$)	Récupéré (\$)	Total (\$)	COE (\$/KWh)
Champ PV	56780	0	0	0	0	56780	0.644
Eolien	60000	0	3835	0	0	63835	
GD	1565	3180	38273	31414	-4	74429	
Batteries	21252	8703	10738	0	-1823	38870	
Convertisseur	7340	3063	0	0	-570	9833	
Système	146937	14946	52846	31414	-2397	243747	

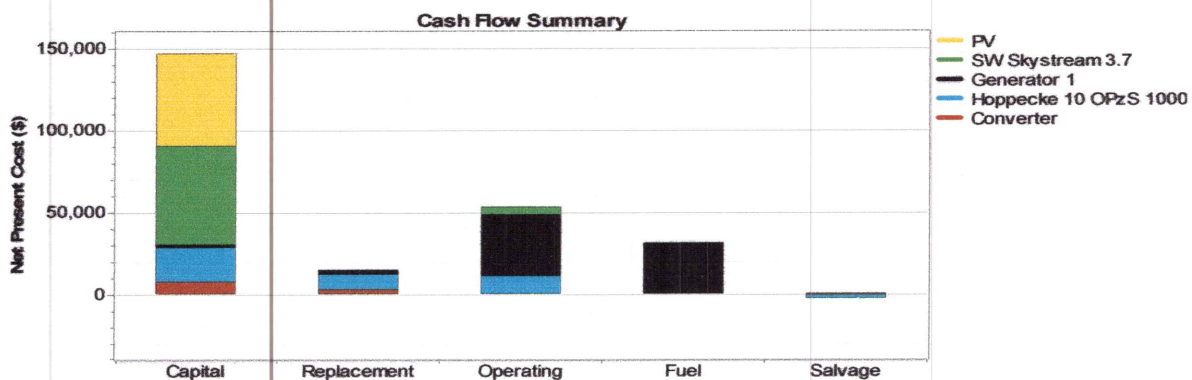


Figure IV.57: Coût net actuel du système 69%PV- 9% éolien-diesel-batterie en fonction des différents coûts de cycle de vie.

Dans ce système comme le représente la figure (IV.58), le générateur diesel (la consommation importante de carburant) et le générateur éolien sont les composants les plus coûteux sur la durée de vie de projet en comparaison avec le champ PV et le système de stockage.

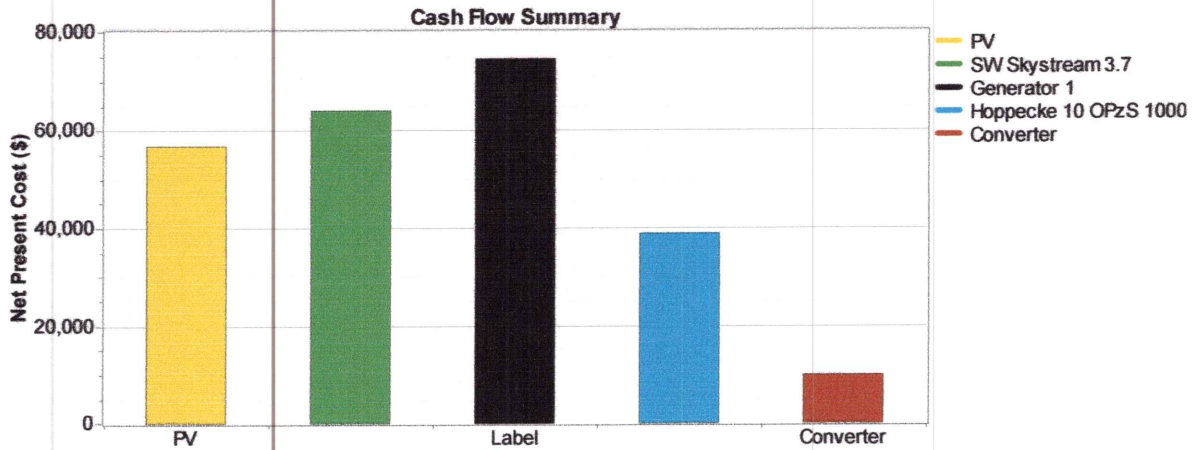


Figure IV.58: Coût net actuel du système 69%PV-9% éolien-diesel-batterie en fonction des coûts des composants du système

Tableau IV.28: Emissions du système d'énergie hybride

Polluants	Dioxyde de Carbone	Monoxyde de carbone	Les hydrocarbures non-brulés	Matières Particulaires	Dioxyde de soufre	oxydes d'azote
Emissions (Kg/An)	8089	20	2.21	1.29	16.2	178

La quantité totale des polluants émis annuellement est estimée égale à 8306.7 Kg/an, tableau (IV.28).

IV.3.10 Systèmes hybrides PV-éolien-diesel sans stockage

Les systèmes hybrides étudiés dans cette partie consistent en un système PV avec un système éolien fonctionnant en parallèle avec un GD et des convertisseurs de puissance. L'architecture du système hybride est représentée par la figure (IV.59). La configuration optimale est constituée d'un champ PV d'une puissance crête de 5KW, un générateur éolien de puissance nominale de 1.8 kw, un générateur diesel d'une puissance nominale de 5KW et un convertisseur de puissance d'une puissance nominale égale à 10Kw.

L'énergie électrique produite par le système hybride annuellement est représentée par la figure (IV.60). Le système produit 33278KWh/an d'électricité dont 11709Kwh est produite

par le champ PV, 2906Kwh est produit par les éoliennes et 18664Kwh par le générateur diesel. Les caractéristiques techniques et énergétiques du système sont représentées par le tableau (IV.29).

La puissance de sortie du champ PV est représentée par la figure (IV.61). La figure (IV.62) représente la puissance générée par le générateur diesel .La figure (IV.63) représente la puissance générée par le générateur éolien. On remarque que le GD fonctionne pendant en mode complémentaire avec le système PV et le système éolien. Durant l'absence des ressources renouvelables la quantité d'énergie demandée par la charge est assurée par le GD.

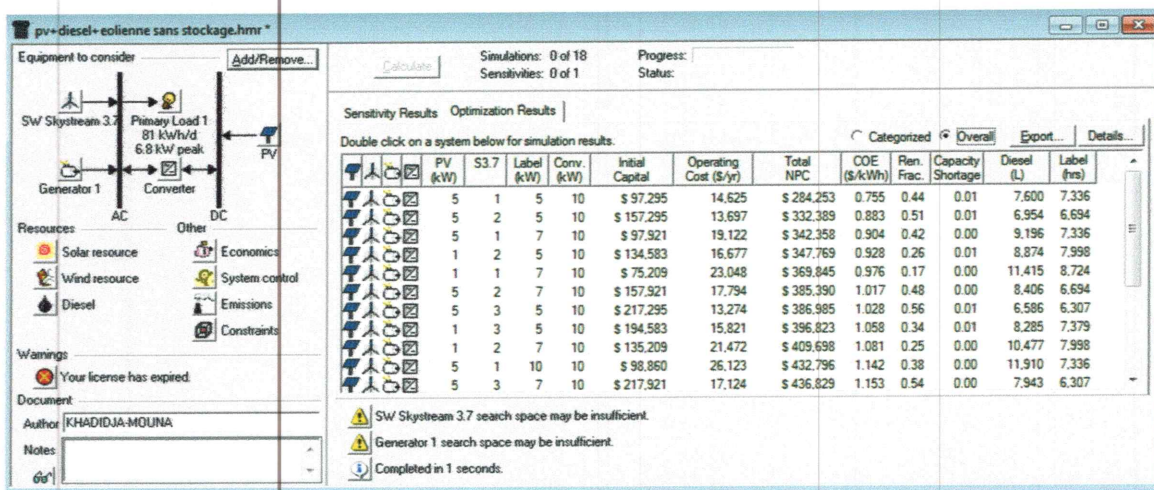


Figure IV.59 : Architecture du système hybride 35%PV-9% éolien- diesel.

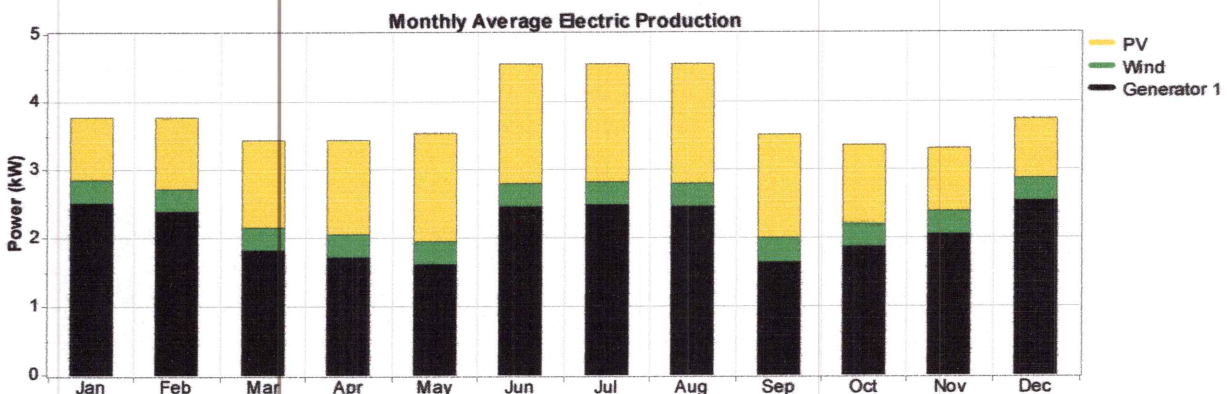


Figure IV.60: Production énergétique mensuelle du système hybride 35%PV-9%éolien-diesel-batterie

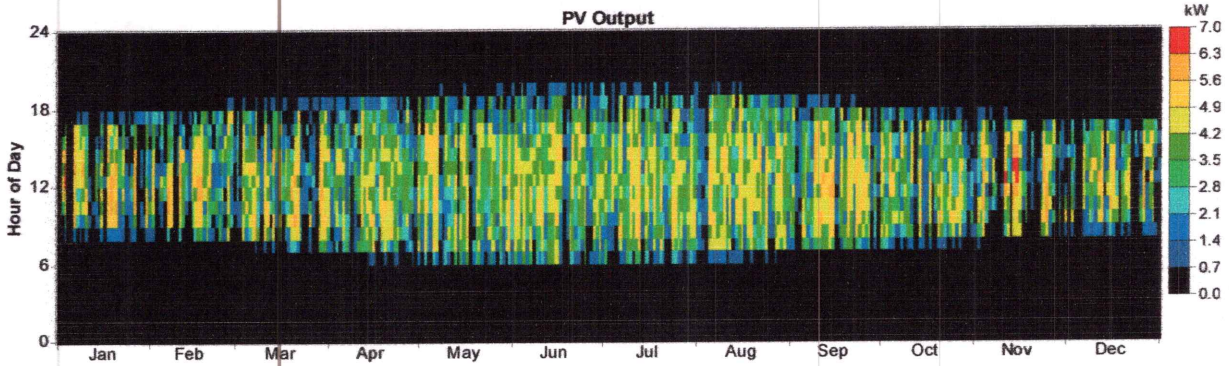


Figure IV.61: Production annuelle du système PV.

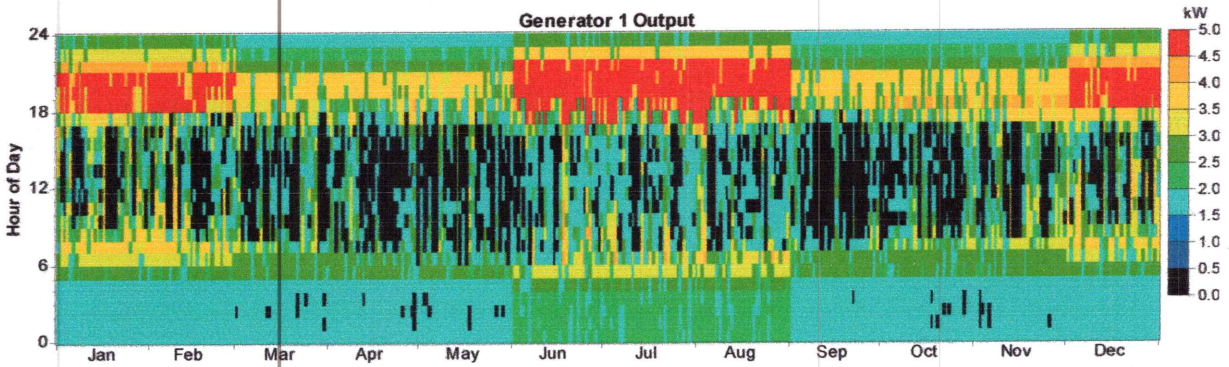


Figure IV.62: Production annuelle du générateur diesel.

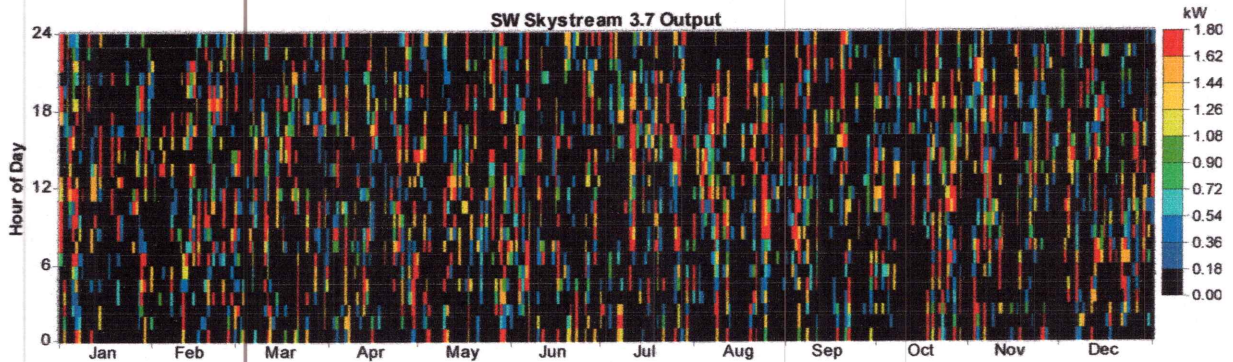


Figure IV.63: Production annuelle du générateur éolien.

Tableau IV.29: Caractéristiques techniques et électriques du système énergétique.

Composant	Taille KW	Production KWh	Consommation KWh	Excès KWh (%)	Consommation carburant (L/an)
Champ PV	5	11709	29442	879	7600
Eolien	1.8	2906			
GD	5	18664			
Convertisseur	10	-----			
Système		33278			

L'analyse économique du système est donnée par le tableau (IV.30), le coût net actuel du système est estimé être égal à 284,818\$. Le système génère de l'énergie électrique avec un coût de revient égal à 0.755\$/KWh.

Sur la figure (IV.64), est représentée la répartition du coût net actuel du système en fonction des différents composants du système énergétique. La figure (IV.65) représente le coût net actualisé en fonction des différents coûts du système qui sont le coût capital, le coût de remplacement, le coût d'O&M, le coût du carburant ainsi que le coût récupéré à la fin de vie du projet.

D'après les résultats présentés dans le tableau (IV.30) et la figure (IV.64), On remarque que les coûts initiaux de générateur éolien, des modules PV et du système de stockage sont les composantes importantes du coût capital initial du système. La deuxième composante importante est le coût d'opération suivi par le coût de consommation de carburant.

Tableau IV.30: Caractéristiques économiques du système énergétique.

Composant	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	Carburant (\$)	Récupéré (\$)	Total (\$)	COE (\$/KWh)
Champ PV	28390	0	0	0	0	28390	0.755
Eolien	60000	0	3835	0	0	63835	
GD	1565	9408	93799	77726	-282	182195	
Convertisseur	7340	3036	0	0	-570	9833	
Système	97295	12471	97614	77726	-852	284253	

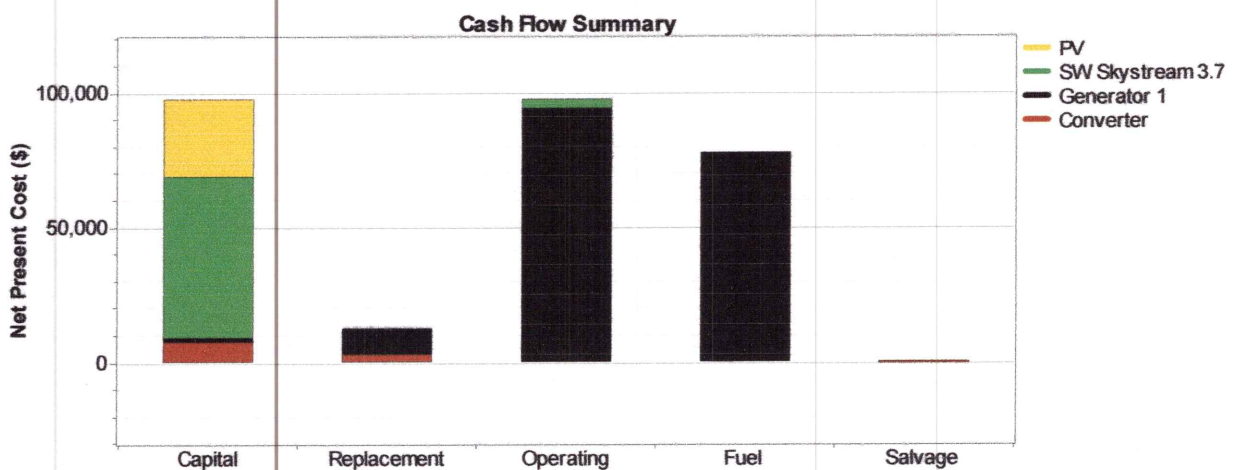


Figure IV.64 : Coût net actuel du système 35%PV- 9% éolien-diesel en fonction des différents coûts de cycle de vie.

Dans ce système comme le représente la figure (IV.65), le générateur diesel est le composant le plus coûteux sur la durée de vie de projet bien que son coût capital initial et son coût de remplacement ne sont pas vraiment élevés en comparaison avec le système éolien et le champ PV, ceci peut être interprété par la consommation importante de carburant.

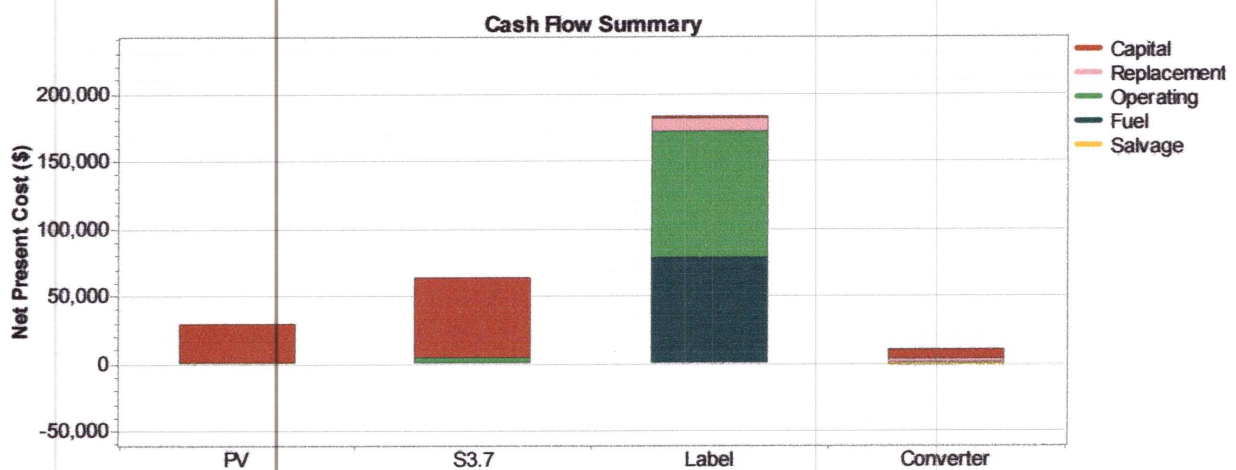


Figure IV.65: Coût netactuel du système 35%PV-9% éolien-diesel en fonction des coûts des composants du système.

Tableau IV.31 : Emissions du système d'énergie hybride.

Polluants	Dioxyde de Carbone	Monoxyde de carbone	Les hydrocarbures non-brulés	Matières Particulaires	Dioxyde de soufre	oxydes d'azote
Emissions (Kg/An)	20014	49.4	5.47	3.19	40.2	441

La quantité totale des polluants émis annuellement est estimée égale à 20553.26 Kg/an, tableau (IV.31).

IV.4: Etude comparative entre les différents systèmes.

Tableau IV.32: Comparaison entre les différents systèmes

Système	Coût du KWh (\$)	Coût du NPC (\$)	Excès d'énergie (KWh/an)	Emissions des GES (kg/an)
GD	0.184	77867	0.0978	37519.42
PV	1.125	422559	12107	0
W	3.756	1408943	11631	0
GD-PV-batterie	0.665	249818	0.00164	20381.5
GD-PV	0.616	231257	1923	22199.16
W-GD-batterie	1.354	507568	49.1	17324.8
W-GD	1.127	425463	2699	25576.28
PV-W-batterie	1.897	712902	9460	0
PV-W-GD-batterie	0.644	243747	723	8306.7
PV-W-GD	0.755	284253	2924	20553.26

Selon l'analyse effectuée dans ce chapitre on remarque qu'un système hybride PV-éolien-GD avec stockage d'énergie est plus rentable pour cette région d'étude en comparaison avec les autres systèmes hybrides étudiés, avec un coût d'énergie égale à 0.644\$/kWh et un coût de cycle de vie égal à 243747\$/kWh. Ce système est également écologiquement avantageux par rapport aux autres systèmes énergétiques avec un taux d'émission de GES annuel égal à 8306.7 Kg.

Pour les systèmes seuls autonomes, comme on peut le voir sur le tableau (IV.32), ils ne sont pas économiquement avantageux : pour le système PV autonome et éolien autonome

ils présentent des coûts de cycle de vie importants dus essentiellement aux capitaux initiaux. Pour le système utilisant seulement des GDs, il présente un coût de cycle de vie dû principalement au coût d'O&M et au coût de carburant.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié différentes configurations de systèmes énergétiques autonomes et hybrides. Une analyse des aspects économiques, énergétiques et environnementaux a été élaborée pour pouvoir mettre en évidence les avantages de l'hybridation des ressources renouvelables et conventionnelles. Nous avons trouvé qu'un système hybride PV-éolien-GD-batteries est économiquement et écologiquement avantageux par rapport aux différentes configurations étudiées dans ce chapitre avec une contribution PV égale à 69% et éolienne égale à 9%.

Conclusion générale.

Conclusion générale.

Les habitations dans les zones rurales éloignées et désertiques ne sont pas encore toutes raccordées au réseau électrique à cause des difficultés techniques et économiques. Les générateurs diesel sont le moyen d'électrification principal pour ces régions. Le prix de revient d'électricité produite par ces derniers dépend de la disponibilité du carburant et de l'éloignement du site.

Pour ces raisons, l'intégration des ressources renouvelables semble être une solution rentable pour répondre à une partie des besoins énergétiques de ces populations.

Cependant, la nature intermittente des énergies renouvelables peut conduire à une inadéquation entre l'offre et la demande ce qui pourra induire des fluctuations et des perturbations sur le mini-réseau électrique. Pour pallier à ce problème, des batteries électrochimiques sont utilisées pour stocker l'énergie et la restituer à la demande et ainsi lisser de la puissance (réduction des fluctuations). La littérature a montré que cette solution est très coûteuse et représente un obstacle qui limite la contribution de la ressource solaire dans le système hybride.

En général, la combinaison de sources d'ERs et conventionnelles permettra l'optimisation des systèmes de production d'énergie d'un point de vue technique, économique et environnemental par l'approvisionnement d'une alimentation continue et stable, la réduction des coûts d'opération et de maintenance (O&M) des GDs en minimisant la consommation du carburant, la réduction des émissions et polluants nocifs; pour ces raisons les SEHs sont progressivement utilisés comme systèmes d'alimentation décentralisés pour produire l'électricité localement dans les zones et les collectivités isolées.

Le travail mené dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'optimisation technique et économique de différentes configurations hybrides composées principalement de systèmes PV, d'éoliennes, de générateurs diesel, et de batteries pour le stockage afin de déterminer le mix de composants permettant d'obtenir le système énergétique le plus rentable. Pour cela, dans le quatrième chapitre de ce mémoire, les aspects technique, énergétique,

Conclusion générale.

économique et environnemental de ces systèmes ont été analysés utilisant le logiciel HOMER, pour d'une part montrer les avantages apportés par l'hybridation de plusieurs sources d'énergie de natures différentes et d'autre part pour étudier la sensibilité du système aux éléments qui le constitue sous les conditions de conception imposées dans cette étude. Cette étude nous a permis de trouver le mix énergétique efficace des différentes sources énergétiques qui permet de répondre à la charge avec une contribution PV et éolienne (78%) permettant d'exploiter les avantages de ces énergies.

Références bibliographiques

- [1] Vaughn C.Nelson, Ken L. Starcher, Robert E.Foster, R.Nolon clark, Deon Raubenheimer, «Wind hybride systemes technology characterization », West Texas AM University-AEI, New Mexico State University- SWTDI, USDA-ARS Bushland, Vista University, May 2002.
- [2] E.Ian Baring- Gould, L .Flowers, P.Lunddsager, «Worldwide status of wind-diesel applications » Pre- Workshop Wind-Diesel 101, 2004, Anchorage, Alaska.
- [3] M. Rezkallah, « Amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride ».
- [4] Baghdaai Fazia, « Modélisation et Simulation des Performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables », Mémoire de Magister de université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie ,2011.
- [5] S. Upadhyay, M.P.Sharma. « A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems».
- [6] M. H. Nehrir, C. Wang, K. Strunz, H. Aki, R. Ramakumar, J. Bing, Z. Miao, and Z. Salameh. « A Review of Hybrid Renewable/Alternative Energy Systems for Electric Power Generation: Configurations, Control, and Applications». IEEE Transactions on Sustainable Energy, Oct 2011.
- [7] S. BRIGAND. Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque. complément technique; Mars /Avril2008. www.editionsdumoniteur.com.
- [8] B.Davito, H. Tai, R.Uhlaner. The smart grid and the promise of the Demand-Side management. Mckinsey on smart grid, summer 2010. www.mckinsey.com.
- [9] B. Finamore, H. Zhaoguang, L.Weizheng, L.Tijun, D.Yande, Z.Fuqiu, Y. Zhirong. DEMAND-SIDE MANAGEMENT IN CHINA: Benefits, Barriers, and Policy Recommendations Natural Resources Defense Council October 2003.
- [10] N.OLEKSIY. « Simulation, fabrication et analyse de cellules PV à contacts arrière interdigités ». Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées, Lyon ,2005.

Références Bibliographiques

- [11] Office fédérale des questions conjoncturelles. Centrales Photovoltaïques. Guide pour le dimensionnement et la réalisation des projets, 1996. www.bibliotheque.iffp-suisse.ch/Reference.htm?numrec
- [12] Historique des éoliennes. <http://www.Lei.UCL.ac.be/mulimedia/eIEE/FR/réalisation/EnergiesRenouvelables/index.htm>.
- [13] <http://www.les-energies-renouvelables.eu/principe-de-fonctionnement-de-lenergie-eolienne.html>
- [14] F. Baghdadi, « Modélisation et Simulation des Performances d'une Installation Hybride de conversion d'Energies Renouvelables », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [15] I.Cruz.F.Arias,F.Avia,L.M.Arribas,R.P.Fiffe, « Assessment of different energy storage systems for wind energy integration» European Wind Energy Conference ,2001.
- [16] Grégoire Léna. Mini-réseaux hybrides PV-diesel pour l'électrification rurale : Présentation générale et recommandations pour leur déploiement. ISBN : 978-3-906042-15-2. Juillet 2013.
- [17] Pavan Kumar, A.V. ; Parimi, A.M. ; Uma Rao, K. Performance Analysis of a Two-Diode model of PV cell forPV based generation in MATLAB. International Conference On Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT); 8-10 May 2014.
- [18] G.Hegde, P. Pullammanappallil, C.Nayar. Modular AC Coupled Hybrid Power Systems for the Emerging GHG Mitigation Products Market. TENCON 2003, Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific Region, Oct 2003.
- [19] K. Agbossou, R. Chahine, J. Hamelin, F. Laurencelle, A. Anourar, J.-M. St-Arnaud, and T. K. Bose, «Renewable energy systems based on hydrogen for remote applications» J. Power Sources, 2001.
- [20] S.-H. Ko, S. R. Lee, H. Dehbonei, and C. V. Nayar, « Application of voltage- and current-controlled voltage source inverters for distributed generation systeme» IEEE Trans. Energy Convers, Sep, 2006.
- [21] Article sur l'énergie solaire - Photovoltaïque. Renewable Energy Transfer System. IHK, Zetis.

Références Bibliographiques

- [22] N.kasbedji Merzouk, « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil verticale de la vitesse du vent en Algérie », thèse de doctorat, Tlemcen, Algérie, 2006.
- [23] M.Belhadj, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome », Mémoire de magister, Université de Bechar, Algérie, 2007.
- [24] S.Moussa, A.Kaabèche et M. Belhamel, « Evaluation des Performances d'un Système Hybride de Production d'Electricité », Revue. Energie Renouvelable, 1999.
- [25] Ionel vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », thèse de doctorat, Université de Havre, France, 2005.
- [26] D. Turcotte, M. Ross, F. Sheriff. Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools: status and needs. In: PV Horizon: workshop on photovoltaic hybrid systems, Montreal; Canada, September, 2001.
- [27] RETSCREEN home page: <http://retscreen.gc.ca/>.
- [28] C.Diara. Atelier régional de formation avancée sur RETSREEN. 24-26 Août 2011.
- [29] Long-range Energy Alternatives Planning System: EXERCICES DE FORMATION. Mars 2006.
- [30] Stockholm Environment Institute. Community for energy, environment and development. <<http://www.energycommunity.org/>> .
- [31] R. Dufo-López. iHOGA : User Manual. 2013.
- [32] Getting Started Guide for HOMER Version 2.1. <https://www.homerenergy.com>.
- [33] T. Lambert, P. Gilman, P. Lilienthal. Micropower System Modeling With Homer. CHAPTER 15. <http://onlinelibrary.wiley.com/>.p.379–418.
- [34] S. Sinha, S.S. Chandel. « Review of software tools for hybrid renewable energy systems ». Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014.
- [35] E. Ian Baring-Gould. User Manual: Hybrid2; The Hybrid System Simulation Model; Version 1.0. National Renewable Energy Laboratory. June 1996.
- [36] D. Markovic, D. Cvetkovic, B. Masic. Survey of software tools for energy efficiency in a community. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011.
- [37] [http:// www.trnsys.com](http://www.trnsys.com).
- [38] H. Ibrahim, J. Lefebvre, JF. Methot, JS. Deschenes. « Numerical modeling wind–diesel hybrid system: overview of the requirements, models and software tools ». In: Proceedings of the IEEE electrical power and energy conference, Winnipeg, MB; 3–5 October, 2011.
- [39] <http://www.inseldi.com/>

Références Bibliographiques

- [40] TR. Morgan, R.H. Marshall, B.J. Brinkworth. « ARES: a refined simulation program for the sizing and optimization of autonomous hybrid energy systems». Solar Energy 1997.
- [41] Rezzouk, H., Hatti, M., Rahmani, H., Atoui, S. (2014). « Assessment of Solar Hydrogen Production in an Energetic Hybrid PV-PEMFC System». World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 93, International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering.
- [42] German Technical Cooperation(GTZ), The 2012/13 International Fuel Prices report, The 2012/13 edition, Germany, April 2013, p.05-06.
<http://www.giz.de/expertise/downloads/Fachexpertise/giz2013-en-ifp2013.pdf>

Résumé :

Dans les zones rurales isolées, l'énergie électrique est fournie principalement par des générateurs diesel. A cause des limitations techniques et environnementales des générateurs diesel, les énergies renouvelables peuvent contribuer en partie dans la production de l'énergie électrique pour ces régions formant ainsi des systèmes d'énergie hybrides (SEH). Les systèmes hybrides sont considérés les plus fiables pour l'économie.

Nous avons simulé et optimisé un système hybride constitué de systèmes de conversion d'énergie renouvelable, PV, éolien et conventionnel (générateur diesel) et le système de stockage en utilisant l'outil de simulation; le logiciel HOMER. Les données climatiques du site de Bou-Ismaïl wilaya de Tipaza ont été utilisées dans cette étude. Le système d'énergie est destiné à alimenter en énergie électrique une maison avec trois profils de charge différents.

Le système hybride PV-éolien-générateur diesel-batteries a été trouvé le plus rentable et le plus avantageux en comparaison avec toutes les configurations étudiées dans ce travail avec une contribution renouvelable égale à 78%.

Abstract :

In remote rural areas, electricity is provided mainly by diesel generators. Because of the technical and environmental limitations of diesel generators, renewable energies could contribute in part in the production of electrical energy for these regions thus forming hybrid energy systems (HES). Hybrid systems are considered the most reliable for the economy.

We have simulated and optimized a hybrid system consisting of renewable energy conversion systems : PV, wind, conventional (diesel generator), and the storage system using the simulation tool; the HOMER software. Climate data of Bou-Ismaïl wilaya of Tipaza site were used in this study. The energy system is intended to supply electrical power to a house with three different load profiles.

The PV-wind-diesel generator-batteries hybrid system was found the most profitable and most advantageous in comparison with all configurations studied in this work with a renewable fraction equal to 78%.