

## **TABLES DE MATIERES**

TABLES DE MATIERES .....	i
NOMENCLATURE .....	iii
Lettres latines.....	iii
Lettres grecques .....	iv
LISTE DES ACRONYMES.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX .....	vii
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 : SYSTEMES HYBRIDES .....	4
1.1 Définition.....	4
1.2 Structure des systèmes hybrides.....	4
1.2.1 Systèmes hybrides combinant les sources d'énergies renouvelables.....	4
1.2.2 Systèmes hybrides combinant les sources d'énergies renouvelables avec les sources d'énergies classiques.....	5
1.2.3 Systèmes hybrides combinant des sources d'énergies renouvelables avec des systèmes de stockage .....	5
1.3 Principe de fonctionnement .....	5
1.4 Principaux composants des systèmes hybrides .....	7
1.4.1 Modules photovoltaïques .....	7
1.4.2 Éoliennes.....	11
1.4.3 Systèmes de commande .....	14
1.4.4 Générateurs de secours .....	15
1.4.5 Systèmes de stockage .....	15
CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES .....	17
2.1 Matériels .....	17
2.1.1 Matlab et Simulink .....	17
2.1.2 Processus de modélisation sous Simulink.....	17
2.2 Méthodologie .....	17
2.2 .1 Hypothèses du travail.....	18
2.2.2 Modélisation physique d'une cellule photovoltaïque .....	18

2.2.3 Générateur éolien.....	22
2.3 Groupe électrogène : .....	24
2.4 Microcontrôleur .....	25
2.5 Batterie d'accumulateurs : .....	26
2.6 Système hybride électrique.....	28
2.6.1 Structure générale du système.....	28
2.6.2 Structure du système.....	29
2.6.3 Principe de fonctionnement.....	29
2.6.4 Modélisation en Matlab/Simulink d'un système hybride .....	32
2.7 Etude du rayonnement solaire.....	33
2.7.1 Paramètre caractéristique du rayonnement solaire : .....	33
2.7.2 Rayonnement incident sur le plan incliné.....	35
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATION.....	37
3.1 Puissance produite par le générateur éolien et le générateur photovoltaïque. ....	37
3.2 Résultats visualisés sur l'oscilloscope. ....	38
CONCLUSION .....	43
REFERENCES .....	44

## NOMENCLATURE

### Lettres latines

Symbole	Définition	Unités
a	Albédo du sol	[-]
C	Capacité de la batterie	[-]
C <sub>10</sub>	Capacité de la batterie déchargée en 10h	[Ah]
C <sub>p</sub>	Coefficient aérodynamique	[-]
e	Charge élémentaire de l'électron	[C]
E	Force électromotrice de la batterie	[J]
E <sub>C</sub>	Energie cinétique du vent	[V]
G	Rayonnement global horaire qui frappe un plan incliné	[W/m <sup>2</sup> ]
GSC	Constante solaire	[W/m <sup>2</sup> ]
H	Hauteur du soleil	[m]
H	Rayonnement global sur le plan horizontal	[W/m <sup>2</sup> ]
H <sub>b</sub>	Rayonnement direct sur le plan horizontal	[W/m <sup>2</sup> ]
H <sub>d</sub>	Rayonnement diffus sur le plan horizontal	[W/m <sup>2</sup> ]
H <sub>o</sub>	Rayonnement extraterrestre	[W/m <sup>2</sup> ]
I	Courant à la sortie de la cellule	[A]
I <sub>b</sub>	Intensité de la batterie	[A]
I <sub>10</sub>	Courant de décharge de la batterie en 10h	[A]
I <sub>d</sub>	Courant traversant la diode	[A]
I <sub>ph</sub>	Courant photonique	[A]
I <sub>sh</sub>	Intensité qui traverse la résistance parallèle	[A]
I <sub>S</sub>	Courant de saturation de la diode	[A]
J	Numéro de jour de l'année	[-]
K	Constante de Boltzmann	[J/K]
K <sub>T</sub>	Indice de clarté	[-]
M	Masse d'air	[kg]
N	Constante caractéristique de la diode	[-]
n	Nombres d'éléments de la batterie en série	[-]
P	Puissance développée par la turbine	[W]
P <sub>e</sub>	Puissance électrique du générateur éolien	[W]
P <sub>m</sub>	Puissance mécanique de la turbine	[W]
Q	Capacité de charge manquante de la batterie	[Ah]
R	Rayon du rotor	[m]
R <sub>b</sub>	Ensoleillement direct sur le champ photovoltaïque	[W/m <sup>2</sup> ]
R <sub>S</sub>	Résistance en série	[Ω]
R <sub>sh</sub>	Résistance en parallèle	[Ω]
S	Surface du rotor	[m <sup>2</sup> ]
t	temps	[h]
T	Température de la cellule	[K]

$v$	Vitesse du vent	[m/s]
$V$	Tension aux bornes de la cellule	[V]
$V_{\text{charge}}$	Tension aux bornes de la batterie en charge	[V]
$V_{\text{decharge}}$	Tension aux bornes de la batterie en décharge	[V]
$V_d$	Tension aux bornes de la diode	[V]

### Lettres grecques

Symbole	Définition	Unités
$\theta$	Angle d'inclinaison du module photovoltaïque	[°C]
$\alpha_i$	Angle d'incidence de l'irradiation solaire photovoltaïque	[°C]
$\beta_p$	Angle de rotation des pales	[°C]
$\lambda$	Rapport de vitesse	[-]
$\Psi$	Latitude du site	[°C]
$\delta$	Déclinaison solaire	[°C]
$\Delta T$	Température d'échauffement de la batterie	[°C]
$\theta$	Angle d'orientation du module photovoltaïque	[°C]
$\theta$	Azimut du soleil	[°C]
$\theta$	Angle zénithal du soleil	[°C]
$\Omega$	Vitesse angulaire de rotation de la turbine	[tr/mn]
$\omega$	Angle horaire du soleil	[°C]
$\omega_s$	Angle horaire du soleil à son coucher	[°C]
$\rho$	Masse volumique de l'air	[kg/m <sup>3</sup> ]

## LISTE DES ACRONYMES

GES	Gaz à Effet de serre
JIRAMA	Jiro sy RAno MAlagasy
MATLAB	MATrix LABoratory
MPPT	Maximum Power Point Tracker
STC	Standard Test Condition
TSR	Tip Speed Ratio
CA	Courant Alternatif
CC	Courant Continu
EDC	Etat De Charge

*Rapport-gratuit.com*   
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Configuration à bus CC.....	6
Figure 2 :	Configuration à bus CA.....	6
Figure 3 :	Configuration à bus CC/CA.....	7
Figure 4 :	Structure des cellules solaire.....	8
Figure 5 :	Structure de la conversion d'une éolienne.....	11
Figure 6 :	Exemple de type d'aérogénérateur. ....	12
Figure 7 :	Diagramme des plages de puissances produites par les éoliennes.....	13
Figure 8 :	Représentation fonctionnelle du capteur.....	15
Figure 9 :	Modèle d'une cellule idéale.....	18
Figure 10 :	Modèle d'une cellule réelle.....	19
Figure 11a :	Schéma en bloc d'une cellule photovoltaïque.....	20
Figure 11b :	Schéma en bloc d'un générateur photovoltaïque.....	21
Figure 12 :	Schéma bloc du générateur éolien.....	24
Figure 13:	Schéma bloc du générateur diesel.....	25
Figure 14 :	Schéma synoptique du commutateur.....	26
Figure 15 :	Schéma bloc du microcontrôleur.....	26
Figure 16 :	Structure du système hybride.....	29
Figure 17 :	Organigramme de la gestion des sources.....	30
Figure 18 :	Schéma en bloc du principe général du système hybride.....	33
Figure 19 :	Etat de décharge de la batterie pendant 10h.....	39
Figure 20	Etat de décharge de la batterie pendant 20h.....	40
Figure 21 :	Etat de charge de la batterie à une énergie solaire de 1000Wh, et une énergie éolienne de 500Wh.....	41
Figure 22 :	Etat de charge de la batterie à une énergie solaire de 2000Wh, et une énergie éolienne de 1000Wh.....	42

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b>	Caractéristique du module photovoltaïque .....	21
<b>Tableau 2</b>	Valeurs des coefficients empiriques C1 à C6 de la turbine.....	23
<b>Tableau 3</b>	Caractéristique du générateur éolien.....	24
<b>Tableau 4</b>	Caractéristique du groupe électrogène.....	25
<b>Tableau 5</b>	Caractéristique de la batterie d’accumulateur.....	28
<b>Tableau 6</b>	Vitesse moyenne journaliere.....	31
<b>Tableau 7</b>	Eclairement solaire moyenne journaliere.....	31
<b>Tableau 8</b>	Consommation électrique journaliere.....	31
<b>Tableau 9</b>	Profil de charge journaliere.....	32
<b>Tableau 10</b>	Puissance produite par le générateur éolien.....	37
<b>Tableau 11</b>	Puissance produite par le générateur photovoltaïque.....	38

## INTRODUCTION

La disponibilité des ressources énergétiques suffisantes et fiables favorise le développement durable d'un pays. Or l'électricité est la forme d'énergie couramment utilisée, mais aussi la plus chère. C'est pourquoi, de très nombreuses personnes n'ont pas accès à cette forme d'énergie qui est pourtant nécessaire à leur subsistance et à leur confort.

Surtout pour Madagascar possédant des régions isolées et parfois éloignées des réseaux de distribution électrique, leur extension par la JIRAMA est difficile et coûteuse, voire impossible. En effet, à Madagascar, la production électrique est encore loin d'être stable. Par ailleurs, la production d'électricité des centrales thermiques et hydroélectriques ne satisfait pas les besoins électriques du peuple malgache. C'est pour cette raison que le problème de délestage n'est pas encore résolu et il est toujours remis en cause la discordance entre la production et la consommation. Ainsi, se pose la question de trouver d'autres sources d'énergies alternatives et aussi un procédé de stockage de l'énergie. Dans ce sens, l'exploitation des énergies renouvelables combinant plusieurs sources s'avère intéressante.

Par ailleurs, les techniques d'extraction de ces sources demandent des procédures de modélisation efficaces afin d'optimiser leur fonctionnement et la supervision des équipements installés qui visent, à la fois, à fiabiliser, à abaisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et à augmenter l'efficacité énergétique, [7].

Notre présente étude consiste à étudier la performance des systèmes hybrides et à évaluer les potentialités d'une installation de conversion d'énergie utilisant deux sources d'énergie renouvelables, à savoir solaire et éolienne, et une source d'appoint qui est un groupe électrogène. Leur hybridation avec des batteries et d'autres composants est aussi envisagée et étudiée.

Cette étude peut se faire en deux étapes, d'abord la simulation numérique grâce à des logiciels adéquats, puis la réalisation sur site du modèle simulé. D'où la raison du présent mémoire qui est destiné à la simulation d'un système hybride en utilisant les produits de *Mathworks Inc*. Il s'agit de *Matlab/Simulink* qui est un environnement de conception basé sur des modèles.

C'est un logiciel parfaitement dédié à la résolution des problèmes d'analyse numérique ou de traitement du signal.

Par ailleurs, la plupart des sources d'énergie utilisées pour la production électrique est d'origine fossile (pétrole, gaz naturel, charbon) dont les réserves disponibles sont limitées et en voie de s'épuiser, sans compter que leur combustion engendre des conséquences néfastes sur l'environnement.

Le groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat a préconisé la réduction de dégagement de CO<sub>2</sub>, un des gaz à effet de serre (GES). Ce qui pousse les nations à développer leur production électrique à partir des sources d'énergie renouvelables. Ainsi, les gisements éoliens et solaires devraient être les principales sources d'énergie renouvelables à exploiter dans les siècles à venir.

Ces dernières années, l'exploitation des sources d'énergie renouvelables connues par leur forte croissance est capable de produire de l'électricité sans altérer l'environnement et peut réduire la dépendance en ressources énergétiques. Un système hybride électrique est mis en place afin de satisfaire les besoins électriques des nombreuses personnes vivant dans des sites isolés sans accès à l'énergie électrique et d'empêcher que le gisement fossile ne soit pas la seule source d'énergie à pouvoir soutenir la demande croissante du monde dans ce domaine.

Par ailleurs, actuellement, le monde opte pour l'utilisation des systèmes hybrides pour offrir une alternative de production électrique décentralisée. Mais le dimensionnement de ces systèmes constitue un des problèmes majeurs qui, à la fois, empêche et freine le développement d'un pays, [8].

Feddaoui a affirmé dans son travail, qu'à l'avenir les énergies renouvelables deviennent le vecteur énergétique important destiné à subir les fortes variations de consommation en donnant leur production maximale possible, [5]. A cet effet, plusieurs recherches à propos de développement durable ont été faites et ceci en vue de satisfaire les besoins énergétiques et de prendre en main la réduction d'émanation des gaz à effet de serre.

En général, ces systèmes nécessitent l'utilisation des batteries de stockage pour assurer la continuité de service et pour améliorer leur fonctionnement.

D'où l'objectif visé par ce travail qui consiste en la contribution à une meilleure intégration aux énergies renouvelables grâce à des systèmes hybrides tout en réduisant les consommations des carburants et la production du CO<sub>2</sub>, ceci à travers les études de la performance d'un de ces systèmes et du comportement du groupe électrogène (consommation en carburant) en fonction des charges.

Le but de notre travail est d'étudier le fonctionnement d'un système hybride solaire/éolien/groupe. Pour cela, nous allons le tester à travers une charge typique d'une maison consommant 800W/j, déterminer le temps de charge de la batterie en variant la dimension des panneaux solaires pour obtenir le point de fonctionnement optimal. Nous allons évaluer aussi l'état de charge de la batterie en fonction de l'intensité du courant qu'il débite. Cette fois-ci, nous allons utiliser des modèles existants pour chaque composant du système et la source d'énergie électrique utilisée est formée d'un module photovoltaïque ayant une puissance crête de 255W, d'un aérogénérateur de puissance nominale de 850W, d'un générateur d'appoint destiné à fournir une puissance de 800W et une batterie d'accumulateurs de 45Ah, de tension nominale de 24V.

Le mémoire présenté comporte 3 chapitres avec l'introduction générale et la conclusion générale.

Ainsi :

- Le premier chapitre développe les systèmes hybrides à travers la définition et la description de leurs composants et leur fonctionnement.
- Le deuxième chapitre rapporte le matériel utilisé et la méthode abordée dans ce mémoire. La méthodologie de modélisation adoptée est ainsi donnée.
- Le troisième chapitre décrit les résultats obtenus. Une interprétation et des discussions de ces résultats obtenus terminent ce chapitre.

## **CHAPITRE 1 :**

### **SYSTEMES HYBRIDES**

#### 1.1 Définition

En termes de système énergétique, les systèmes hybrides regroupent simultanément plusieurs sources d'énergies capables d'approvisionner, à court et long termes, les consommateurs par rapport au système monosource. Ils font partie des solutions innovantes de production électrique pour les pays en voie de développement comme Madagascar et en cours d'exploitation dans des pays développées.

#### 1.2 Structure des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont caractérisés par leur principe de fonctionnement, par leurs différentes sources utilisées et par la présence ou non des éléments de stockage. Généralement, les systèmes hybrides les plus fréquemment utilisés font appel à une source d'énergie renouvelable pouvant être éolienne ou solaire ou hydraulique et associée à un groupe électrogène. Ils sont souvent de type autonome car ils sont destinés à des sites isolés. Parmi les systèmes hybrides les plus répandus dans le monde, on peut distinguer les suivants :

- Les systèmes hybrides combinant des sources d'énergies renouvelables,
- Les systèmes hybrides combinant des sources d'énergies renouvelables et des sources d'énergies classiques,
- Les systèmes hybrides constitués des sources d'énergies renouvelables et des systèmes de stockage.

##### 1.2.1 Systèmes hybrides combinant les sources d'énergies renouvelables

Cette option groupe généralement l'éolienne avec le solaire ou l'hydraulique avec l'éolienne. On remarque que l'exploitation de l'énergie éolienne est toujours présente du fait que le vent est disponible tout le temps, que ce soit le jour ou la nuit, par rapport au soleil qui n'est en disposition que de quelques heures par jour.

Parmi ces deux options citées, on peut dire que la première est plus intéressante par rapport à la seconde puisque de nombreux auteurs ont mené des travaux et études sur la modélisation de ce système.

### 1.2.2 Systèmes hybrides combinant les sources d'énergies renouvelables avec les sources d'énergies classiques

Les générateurs classiques pouvant être des piles à combustible ou réseau électrique sont utilisés comme des générateurs de secours dans des systèmes hybrides. Le système de génération électrique utilisant le groupe électrogène comme appoint se rencontre souvent, la seule différence étant l'association avec des éléments de stockage. Il est plus rentable dans des sites isolés mais plus complexe à modéliser. Le concept de ce système est dû à la propriété d'intermittence des énergies renouvelables. Il doit utiliser ainsi des générateurs d'appoint.

### 1.2.3 Systèmes hybrides combinant des sources d'énergies renouvelables avec des systèmes de stockage

Associé à un système de stockage, ce type de système fait disparaître les problèmes liés aux variations climatiques. Des études faites par plusieurs auteurs indiquent que ce système nécessite la maîtrise de gestion de ces sources, [9].

## 1.3 Principe de fonctionnement

Selon la configuration choisie, le principe de fonctionnement du système hybride varie. Sa configuration est basée sur des bus (bus CC ou CA ou CC/CA). Ainsi, une même configuration peut avoir des fonctionnements différents. Nous pouvons citer les exemples de configuration suivants :

- Configuration à bus CC : système hybride éolien/solaire/groupe. Les deux générateurs (éolien et photovoltaïque) consistent à charger la batterie de stockage. Cependant, le système éolien comporte un circuit redresseur à sa sortie et l'énergie ainsi produite est stockée. Un convertisseur CC/CA ou onduleur assure l'assemblage final à un groupe électrogène. Il y a deux principes de fonctionnement pour cette configuration, selon le cas, lors de la charge des batteries (voir figure 1) :

- Les sources d'énergies renouvelables sont utilisées séparément,
- Elles sont utilisées simultanément pour charger les batteries.

L'énergie ainsi stockée est utilisée directement par la charge et dans le cas où la charge de la batterie est épuisée, le groupe électrogène intervient.

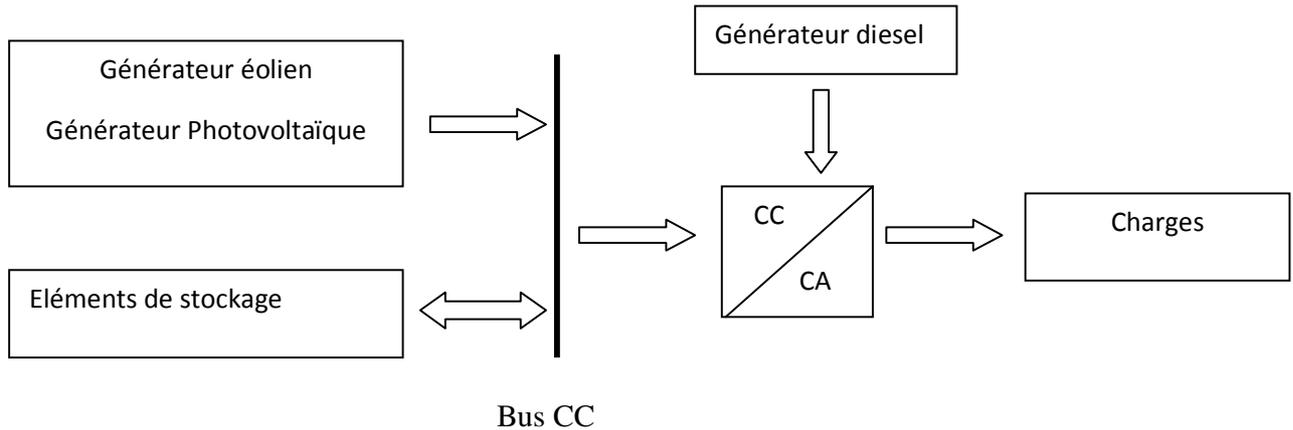


Figure 1 : Configuration à bus CC.

- Configuration à bus CA : système hybride éolien/solaire. Les deux générateurs alimentent la charge, comme l'indique la figure 2, après la conversion en CA de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque.

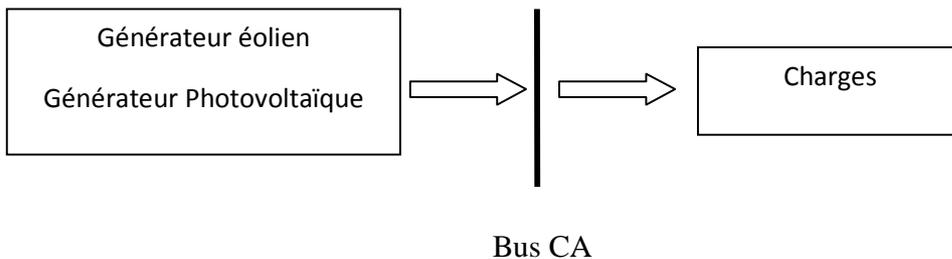


Figure 2 : Configuration à bus CA.

- Configuration à bus CC/CA. : système hybride solaire/groupe (système en commutation)  
La batterie peut être chargée, soit par le générateur photovoltaïque, soit par le générateur diesel. Mais le groupe peut être utilisé directement.

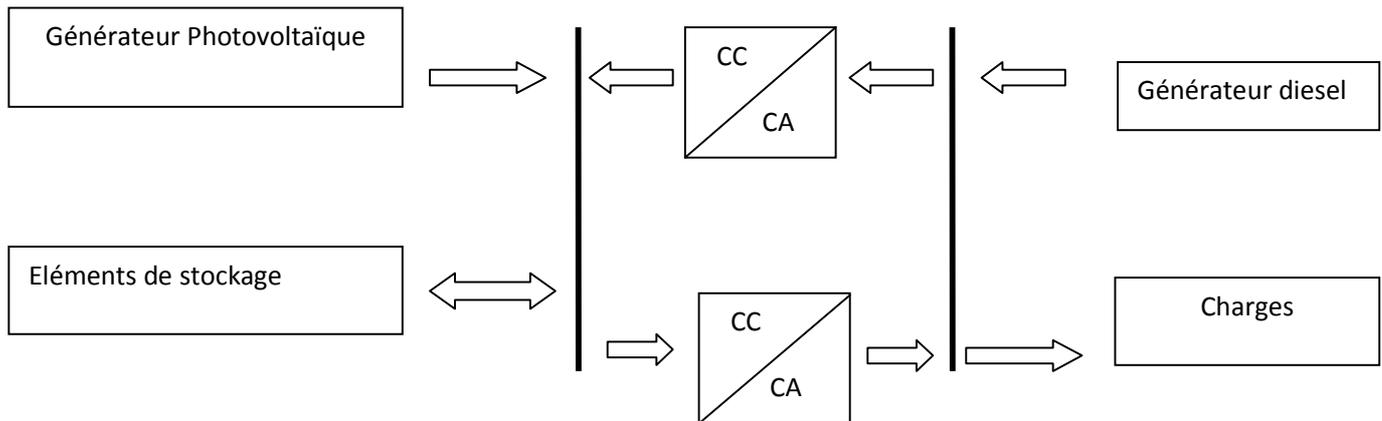


Figure 3 : Configuration à bus CC/CA.

## 1.4 Principaux composants des systèmes hybrides

### 1.4.1 Modules photovoltaïques

Par définition, une cellule photovoltaïque dite aussi jonction PN transforme l'énergie rayonnante du soleil en énergie électrique. Elle est fabriquée à partir d'un matériau appartenant au groupe 4 de la classification périodique de Mendeleïev comme le silicium ou le germanium. Ainsi, une cellule photovoltaïque est une tranche de matériau semi-conducteur entre deux électrodes métalliques.

Une cellule ne satisfait pas les besoins électriques car ses tension et courant sont très faibles. Ainsi, il faut les assembler en série ou/et en parallèle pour avoir un module délivrant un courant et une tension assez élevés. La disposition des cellules en série pose un certain problème car lorsqu'une d'entre elles se trouve à l'ombre ou en défaillance, il y a risque de détérioration de la branche formée par cette mise en série. Effectivement, la cellule de faible courant impose le fonctionnement de l'ensemble, d'où le montage d'une diode dite by-pass en parallèle aux bornes de toutes les cellules mises en série. En plus, une diode nommée diode anti-retour est placée entre le module et la batterie, afin d'empêcher le retour du courant vers le module pendant l'obscurité.

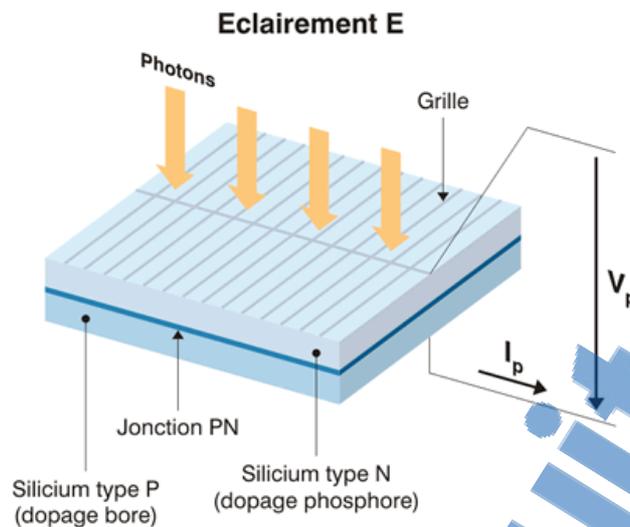


Figure 4 : Structure des cellules solaires. Source [2]

Une cellule est basée sur l'effet photovoltaïque qui est découvert en 1839, pour la première fois, par le physicien français BECQUEREL. Et le principe de conversion lumineuse est la suivante :

- lorsque la lumière arrive sur la couche active de la cellule, il y a absorption des photons par les semi-conducteurs facilitant ainsi la libération et le déplacement des électrons grâce à l'énergie ainsi apportée, d'où la production du courant électrique. Ce courant résulte des déplacements des électrons et trous vers les électrodes, d'où création d'une différence de potentiel entre les bornes de la cellule, [1].
- Dans la jonction PN, le matériau (semi-conducteur) est dopé P d'un côté, par exemple avec du bore, un élément accepteur d'électrons du groupe 3 et dopé N de l'autre côté, par exemple avec du phosphore, un élément donneur d'électrons du groupe 5 (homojonction). Mais d'autres combinaisons sont proposées dans la pratique.

Un module est l'association en série et en parallèle de plusieurs cellules photovoltaïques. Il est caractérisé par un certain nombre de paramètres dans son fonctionnement.

- Puissance crête :

Un module photovoltaïque est classé selon la puissance fournie dans les conditions STC : rayonnement solaire de  $1\text{kW/m}^2$ , une température ambiante de  $25^\circ\text{C}$  et une masse d'air optique égale à 1,5.

- Tension de circuit ouvert

Il s'agit de la tension maximale produite par le module pour un éclairement maximal et sans aucune connexion avec une charge.

- Courant de court-circuit

Il s'agit du courant débité par le module en court-circuit pour un éclairement maximal.

- Intensité en fonction de la tension

Le courant produit par le module et la tension à ses bornes pour un éclairement donné est défini par sa caractéristique  $I(V)$ .

- Point de fonctionnement optimum

C'est la puissance produite par les modules pendant un éclairement de  $1\text{kW/m}^2$ .

- Rendement maximal

Le rendement maximal est défini comme étant le rapport de la puissance électrique optimale et la puissance lumineuse incidente.

- Facteur de forme

C'est le rapport de la puissance électrique optimale et la puissance que la cellule est susceptible de fournir.

Pour exploiter au mieux l'énergie solaire, on utilise le contrôleur MPPT car l'éclairement solaire et la température de jonction de la cellule sont les paramètres importants lors de l'exploitation de l'énergie solaire et en principe, la puissance produite par le générateur photovoltaïque dépend de ces deux paramètres.

En réalité, la puissance maximale produite par le générateur n'arrive pas tout de suite à une charge. Alors pour l'obtenir, on doit procéder à une adaptation appelée adaptation d'impédance qui consiste à insérer un dispositif (convertisseur) commandé entre la charge et le générateur photovoltaïque. Ce dispositif de commande est appelé commande MPPT qui suit son point de puissance maximale.

Généralement, ce convertisseur est de type hacheur (DC/DC). Il existe plusieurs algorithmes basés sur différentes méthodes pour cette commande:

- Méthode basée sur la tension : cette méthode consiste au contrôle de la tension de fonctionnement du générateur par rapport à la tension de référence utilisée.
- Méthode basée sur le courant : sous son nom l'indique, elle est fondée sur l'étude du courant généré par le générateur pour avoir la valeur maximale du courant fourni.
- Méthode basée sur la puissance. cette méthode se repose sur l'étude de la puissance maximale générée par le générateur

Selon les matériaux utilisés et les techniques de fabrication des modules, on peut classer les modules en 2 grandes catégories :

- Les modules fabriqués à partir de silicium pouvant être monocristallins ou poly cristallins ou en ruban.
- Les modules fabriqués en couches minces à partir d'un matériau : tellure de cadmium, diséléniure de cuivre indium, silicium amorphe et silicium cristallin en couche mince.

On appelle installation ou champ photovoltaïque autonome une installation qui comporte les éléments suivants :

- Modules photovoltaïques branchés en série ou en parallèle.
- Batteries de stockage : pour stocker l'énergie produite.
- Onduleur : pour convertir le courant continu issu des modules en courant alternatif.
- Régulateur : qui assure la charge des batteries et contrôle la distribution de courant vers la charge.

Et leur fonctionnement est tel que : l'énergie produite par les modules photovoltaïques est stockée dans des batteries de stockage. Cette énergie est utilisée directement quand la batterie est chargée. Le régulateur de charge assure la charge des batteries c'est-à-dire coupe l'alimentation des modules lorsqu'elles sont chargées. Le régulateur est utilisé du côté utilisation et de la batterie, il permet de limiter la consommation des charges afin d'éviter la décharge profonde de la batterie.

### 1.4.2 Éoliennes

Les éoliennes ou aérogénérateurs sont des appareils électriques destinés à transformer l'énergie du vent en énergie mécanique puis l'énergie mécanique en énergie électrique selon le type d'utilisation. S'ils sont destinés au pompage, la conversion en énergie mécanique suffit et s'ils sont destinés à produire de l'électricité, la deuxième conversion devient utile. Les éoliennes utilisent, d'abord, un rotor actionné par des pales pour produire de l'énergie mécanique, puis, d'un générateur pour convertir cette énergie en énergie électrique. Schématiquement la structure de la conversion éolienne est donnée par la figure 5.

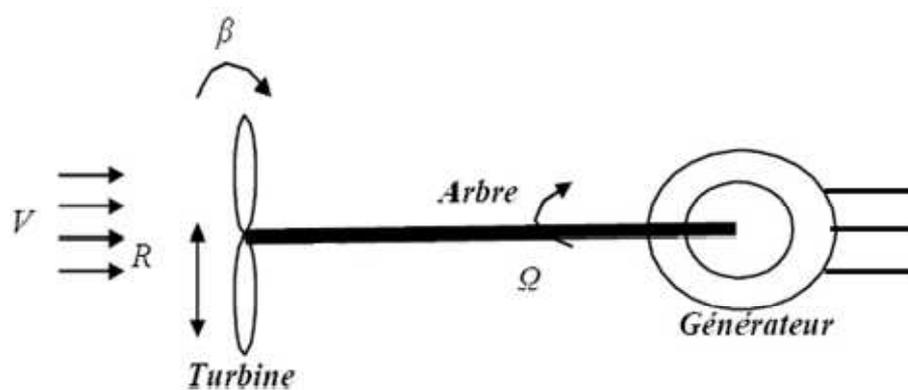


Figure 5 : Structure de la conversion d'une éolienne. Source [2]

Certains générateurs (générateurs à grande vitesse de type commercial) fonctionnent à une grande vitesse et nécessitent, dans ce cas, un multiplicateur de vitesse qui sert à augmenter la vitesse du rotor disponible de son arbre et certains n'en ont pas et sont actionnés directement par le rotor.

Une éolienne classique est dotée de :

- Un mât : sous forme tubulaire (en béton) ou en treillis (en acier) qui supporte la nacelle et le rotor,
- Des pâles : capteurs de vent et fabriqués à partir des matériaux composites qui s'orientent automatiquement suivant la direction du vent,
- D'un rotor : qui fixe les pâles en étant lié à l'arbre du générateur,

- D'une nacelle : composée des éléments électriques et mécaniques nécessaires au fonctionnement d'une éolienne comme le multiplicateur de vitesse, l'arbre de transmission, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de vent très fort de vitesse de l'ordre de 25 à 30m/s, le générateur, l'armoire de régulation aérodynamique et de puissance électrique, les roulements, l'anémomètre qui indique la vitesse du vent pour permettre ainsi aux éoliennes d'arrêter ou de fonctionner,
- D'une girouette : qui indique la direction du vent permettant alors d'orienter la nacelle et les pâles.

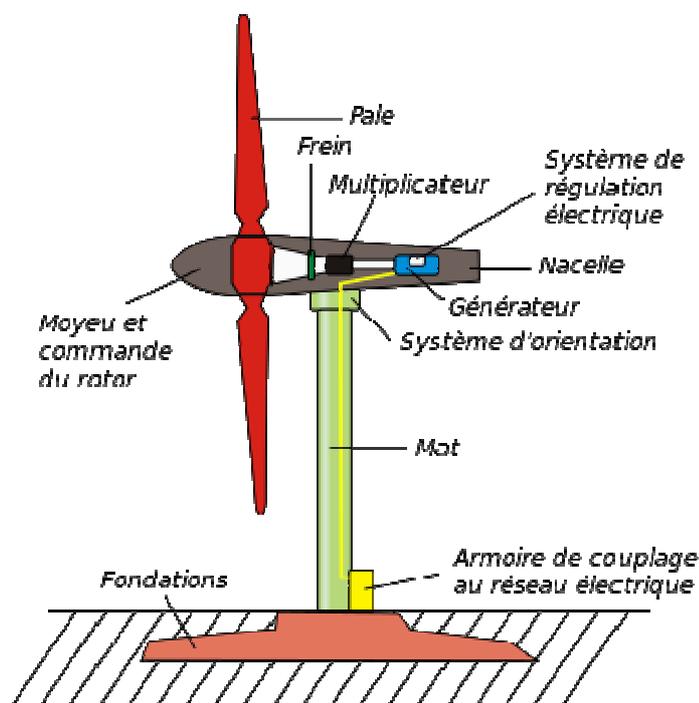


Figure 6 : exemple de type d'aérogénérateur .Source : <http://encyclopedie-energie.org>.

Un système de régulation mécanique est installé sur des éoliennes afin de protéger les éoliennes contre le vent très violent [3]. C'est ainsi que les éoliennes aient les caractéristiques suivantes:

- : puissance nominale, puissance maximale que la turbine peut fournir.
- : vitesse nominale, vitesse correspondant à la puissance .
- : vitesse de démarrage de l'éolienne.

- : vitesse d'arrêt.

Une plage de puissance produite par les aérogénérateurs peut être définie en fonction de la vitesse de vent, illustré par le diagramme indiqué sur la figure 7. Il existe ainsi quatre zones qui sont :

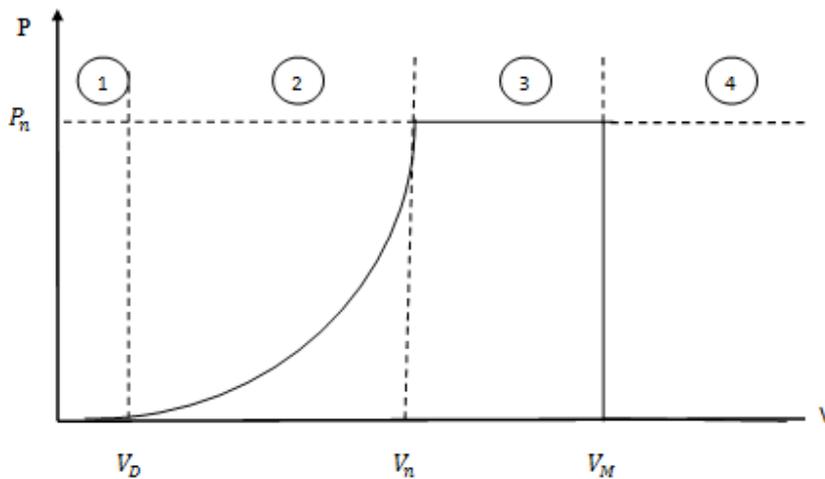


Figure 7 : Diagramme des plages de puissances produites par les éoliennes.

- Zone 1 : l'éolienne ne fonctionne plus c'est-à-dire  $P = 0$ .
- Zone 2 : l'éolienne commence à produire à partir d'une vitesse de démarrage et sa puissance augmente progressivement en fonction de la vitesse de vent.
- Zone 3 : La vitesse de rotation de la turbine reste constante, d'où la puissance produite reste à une valeur constante
- Zone 4 : L'éolienne ne fonctionne plus pour des raisons de sécurité.

On peut classer les éoliennes en fonction de leur type d'axe :

- Éoliennes à axe vertical,
- Éoliennes à axe horizontal.

On distingue parmi les installations éoliennes, les installations autonomes qui comportent généralement :

- Un générateur éolien,
- Un régulateur de charge /décharge pour éviter la surcharge et la décharge profonde de la batterie,
- Une batterie de stockage pour les installations autonomes,
- Une charge de délestage,
- Un redresseur pour convertir le courant alternatif en courant continu.

Pour les éoliennes utilisées à la production électrique décentralisée (autonome), les batteries de stockage doivent être utilisées afin de prévoir le déficit énergétique. Les charges sont alimentées par les générateurs éoliens et le surplus de production est utilisé pour recharger des batteries. Si la production du générateur éolien ne répond pas aux besoins des consommateurs, la batterie alimente la charge. Le processus de charge de la batterie est assuré par le régulateur de charge et si la batterie est complètement chargée, le générateur éolien est relié à la charge de délestage.

#### 1.4.3 Systèmes de commande

Les systèmes de commande nommés systèmes de supervision sont le noyau des systèmes hybrides car ils permettent de gérer de façon automatique les différentes sources selon leur disponibilité en fonction des charges. Un des systèmes de commande que nous allons choisir est le microcontrôleur, il est un composant électronique programmable. On le programme à l'aide d'un ordinateur par l'intermédiaire d'un langage informatique souvent propre au type de microcontrôleur utilisé. Notre étude ici présente utilise le système arduino pour programmer les systèmes informatiques à cause de son prix moins cher et de son caractère plus performant. Il est composé de deux éléments qui sont :

- La carte électronique basée autour d'un microcontrôleur ATMEGA du fabricant ATMEL,
- Le logiciel qui nous permet de programmer cette carte. Dans ce travail de mémoire, le microcontrôleur arduino est la base du circuit de commutation. Ainsi dans la pratique, il est relié à un capteur de courant électrique (souvent le capteur à effet Hall) qui détecte et mesure le courant dont la charge a besoin. Le microcontrôleur choisit alors la source d'énergie correspondant à cette charge.

Cet appareil ne fonctionne sans information, et ceci nécessite un appareil appelé capteur : c'est un appareil qui collecte une information à partir de la mesurande (grandeur physique à mesurer à l'entrée du capteur) et qui donne une réponse (information à la sortie du capteur) sous forme d'un signal. La fonction de cet appareil est représentée par la figure 8.

Entrée :

Sortie :

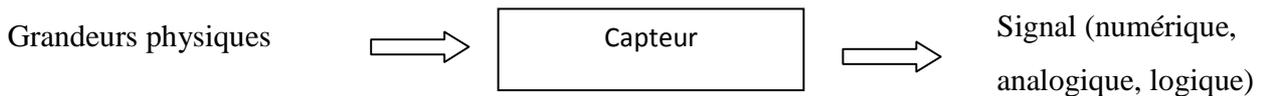


Figure 8 : Représentation fonctionnelle du capteur

Selon les phénomènes physiques (effet photovoltaïque, effet thermoélectrique, effet hall,...) qui se passent dans les capteurs, on peut citer :

- Les capteurs actifs qui agissent sur la mesurande : force, pression, accélération, ...
- Les capteurs passifs qui concernent la mesurande de type impédance.

Les grandeurs suivantes sont utilisées pour caractériser un capteur :

- Étendue de mesure : les valeurs extrêmes pouvant être mesurées par le capteur,
- Résolution : la plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur,
- Sensibilité : la variation du signal de sortie par rapport à celle du signal d'entrée,
- Précision : l'aptitude du capteur à donner une valeur proche de la valeur vraie,
- Rapidité : le temps de réaction du capteur.

#### 1.4.4 Générateurs de secours

Parfois les systèmes hybrides sont accompagnés des générateurs de secours comme les accumulateurs ou le groupe électrogène. Cela est dû au caractère aléatoire des énergies renouvelables. Leur fonction principale est de délivrer une puissance utile à la charge dans le cas où les sources primaires ne sont pas disponibles.

#### 1.4.5 Systèmes de stockage

Cette option est basée sur le choix de la structure des systèmes hybrides étudiés.

En général, les systèmes de stockage sont utilisés quand on associe deux ou plusieurs sources, par exemple les éoliennes et les énergies solaires ou les éoliennes et le groupe électrogène.

## **CHAPITRE 2 :**

### **MATERIELS ET METHODES**

#### 2.1 Matériels

##### 2.1.1 Matlab et Simulink

Matlab est un logiciel destiné à l'usage scientifique, parfois à la résolution des problèmes d'analyse numérique et des calculs mathématiques. Simulink est une extension graphique de Matlab qui sert aux modélisations et simulations des systèmes dynamiques. Il possède une interface graphique déplaçable à l'aide d'un souris et des nombreuses bibliothèques de modèle comme des composants électriques (diode, résistance,..) et des composants mathématiques (signe, des opérateurs logiques,...) adaptés aux besoins de l'utilisateur.

##### 2.1.2 Processus de modélisation sous Simulink

L'utilisation de Simulink pour créer un modèle est commencé par :

- Création des blocs des systèmes

Il suffit de déterminer les différents composants appelés blocs qui constituent les systèmes étudiés, par exemple des signes pour les équations mathématiques et des composants électriques pour les modèles électriques et ensuite,

- Création des liaisons entre les différents composants des systèmes

Cette étape consiste à relier par des flèches les différents composants du système selon les objectifs à atteindre et de vérifier si les composants peuvent être reliés ou non. Terminé par,

- Modification des contenus des blocs

Les contenus ou les valeurs des composants utilisés peuvent être modifiés par les paramètres du bloc utilisés.

#### 2.2 Méthodologie

### 2.2 .1 Hypothèses du travail

Dans l'établissement du modèle mathématique du système étudié, les hypothèses suivantes sont considérées :

- Lors de la conversion lumineuse, on considère qu'il n'y a ni de perte de tension ni existence de courant de fuite.
- Nous admettons que le coefficient de puissance utilisé a la valeur de 0 ,42.
- Le générateur éolien utilisé est actionné directement par le rotor (ne possède pas de multiplicateur de vitesse).

### 2.2.2 Modélisation physique d'une cellule photovoltaïque

Théoriquement, le phénomène de conversion lumineuse au niveau de la cellule photovoltaïque peut être traduit par des circuits électriques. Dans la littérature, on distingue plusieurs modèles de circuit électrique équivalent à une cellule solaire. On distingue, parmi elles, les cellules idéales et les cellules réelles. Celles-ci sont caractérisées par le comportement du courant-tension  $I(V)$ .

Les cellules idéales :

Elle peut être définie comme une source de courant variable qui produit un courant créé par des photons appelés courant photonique dépendant de l'éclairement et de la température de jonction de la cellule, en parallèle avec une diode qui correspond à la jonction P-N (voir figure 9) .

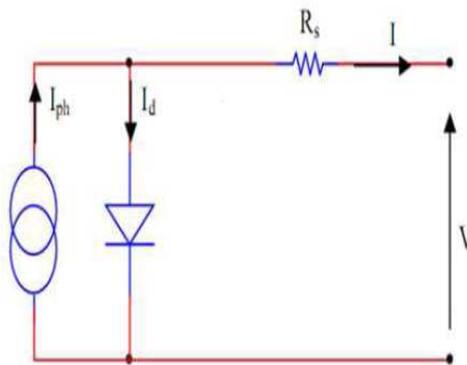


Figure 9 : Modèle d'une cellule idéale.

D'après la loi de nœud, le courant  $I$  à la sortie de la cellule est :

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

Avec :  $I_{ph}$ , le courant délivré par le générateur de courant,

$I_d$ , le courant traversant la diode donné par la relation :

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

$n$  étant une constante caractéristique de la diode,

$k$ , la constante de Boltzmann,

$T$ , la température de la cellule,

$e$ , la charge élémentaire de l'électron,

$I_s$ , le courant de saturation de la diode,

$V$ , la tension de la charge à la sortie.

D'où le courant débité par la charge est:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Les cellules réelles :

La cellule réelle, modélisée selon la figure 10, diffère de celle idéale à travers la considération des phénomènes physiques qui se produisent lors de la conversion de la lumière en électricité c'est-à-dire le courant de fuite et la perte de tension qui sont représentés respectivement par les résistances série et parallèle.

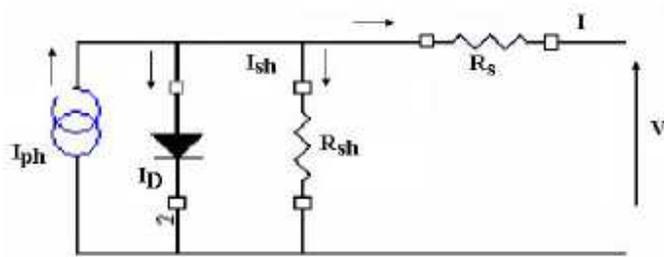


Figure 10 : Modèle d'une cellule réelle.

L'expression de  $I$  délivré par la cellule réelle à sa sortie est, d'après le circuit de la Figure 10, de :

$$I = \frac{I_{ph}}{R_s} - \frac{V}{R_s} - I_0 \exp\left(\frac{e(V - I R_s)}{nkT}\right) \quad (4)$$

est la tension aux bornes de la diode telle que, si  $R_s$  est la résistance en série, il vient :

$$V = I R_s + V_d \quad (5)$$

L'intensité  $I$  qui traverse la résistance parallèle est

$$I = \frac{V_d}{R_p} \quad (6)$$

Ainsi le courant à la sortie de cellule est :

$$I = \frac{I_{ph}}{R_s} - \frac{V}{R_s} - I_0 \exp\left(\frac{e(V - I R_s)}{nkT}\right) \quad (7)$$

Selon Matlab/Simulink, le schéma en bloc d'une cellule photovoltaïque idéale est indiqué sur la figure 11a. Quant au générateur photovoltaïque, son schéma en bloc est donné par la figure 11b.

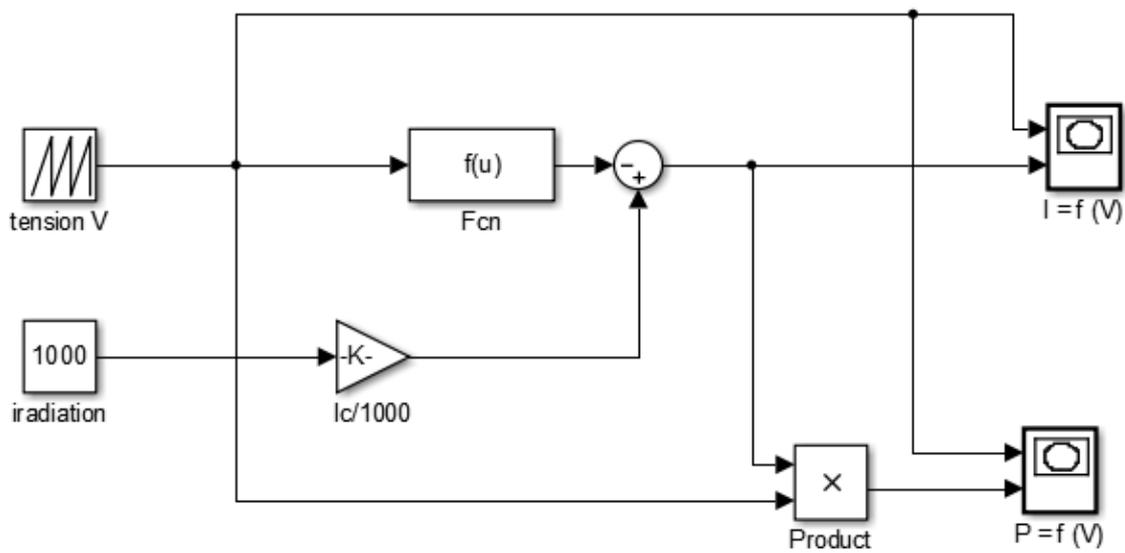
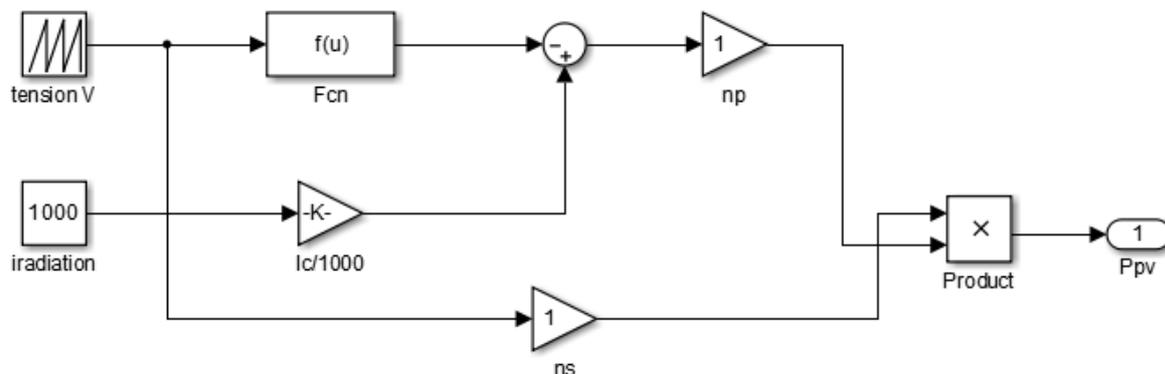


Figure 11a : Schéma en bloc d'une cellule photovoltaïque.



**Figure 11b** : Schéma en bloc d'un générateur photovoltaïque

Sur ces deux modèles, nous avons comme paramètre :

le nombre de cellule en série et en parallèle de la cellule, sa température, l'irradiation solaire et l'intensité du circuit ouvert du générateur photovoltaïque, la tension du système maximale et nous avons comme résultat la puissance générée, le comportement de I en fonction de V et P en fonction de V du générateur.

Dans cette étude, nous avons utilisés les modules photovoltaïques ayant des caractéristiques suivantes :

**Tableau1** : Caractéristiques du module photovoltaïque

Modèle	JA Solar JAM6 (BK)-60-255/51 Mono
Puissance crête	255 W ,+5%,-0%
Tension syst max	1000V
Tension de service	30,62V
Courant de service	8,31A
Tension de circuit ouvert	38,10
Courant de court- circuit	8,72A
Type de cellule	Silicium monocristallin
Cellule par panneaux	60 pc

### 2.2.3 Générateur éolien

La puissance électrique produite par le générateur éolien est obtenue en tenant compte des rendements des différents éléments formant le système éolien.

Elle est définie comme étant la variation de l'énergie cinétique par rapport au temps :

l'énergie apportée par l'air de masse  $m$  et en mouvement (énergie cinétique du vent) avec une vitesse  $v$  est donnée par la formule :

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (8)$$

L'équation (9) nous donne le débit massique  $dm$  de l'air qui traverse le rotor de surface  $S$  pendant l'intervalle de temps  $dt$  par la relation :

$$dm = \varrho * v * S * dt \quad (9)$$

Si  $\varrho$  est sa masse volumique.

La puissance  $P$  développée par la turbine est ainsi la variation de l'énergie cinétique du vent par unité de temps et est donnée comme suit :

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} * dm * v^2 \right) \quad (10)$$

Soit

$$P = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * S \quad (11)$$

La puissance mécanique d'une turbine éolienne dépend de l'architecture du système étudié et de la performance de l'éolienne. En indiquant par  $C_p$  le coefficient de conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique de l'éolienne, la puissance mécanique  $P_m$  donnée par la turbine est donnée par la relation :

$$P_m = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * S * C_p \quad (12)$$

La puissance électrique utilisable est telle que :

$$P_e = P_m * \eta_m * \eta_g \quad (13)$$

$\eta_g$  étant le rendement du générateur et  $\eta_m$ , celui du multiplicateur, si on considère que le système éolien est formé de rotor, de multiplicateur et de la génératrice.

Le rendement de cette appareil est défini par le coefficient de puissance  $C_p$  :

De nombreux auteurs donnent une expression de celui-ci appelé aussi coefficient aérodynamique. Selon Dario Morales [4], il existe deux types de modèle de coefficient de puissance, l'un pour le petit éolien et l'autre pour l'aérogénérateur. La première diffère de la deuxième par la présence de l'angle de calage des pales, il est fonction du rapport de vitesses  $\lambda$  ou *tip speed ratio* (TSR) et de la vitesse angulaire de rotation de la turbine et de l'angle de rotation des pâles  $\beta_p$  :

$$C_p(\lambda, \beta_p) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda} - C_3 * \beta_p - C_4 * \beta_p^x - C_5 \right) * e^{-\frac{C_6}{\lambda}} \quad (14)$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08 * \beta_p} - \frac{0.035}{\beta_p^3 + 1} \quad (15)$$

Et

$$\lambda = \frac{R * \Omega}{v} \quad (16)$$

Les valeurs des coefficients empiriques  $C_1$  à  $C_6$  spécifiques pour la turbine sont dressées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Valeurs des coefficients empiriques  $C_1$  à  $C_6$  de la turbine.

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
0,5	116	0,4	0	5	21

Pour le petit éolien, il est fonction de  $\lambda$  seulement :

$$c_p(\lambda) = 0,043 - 0,108 * \lambda + 0,146 * \lambda^2 - 0,0602 * \lambda^3 + 0,0104 * \lambda^4 - 0,0006 * \lambda^5 - 0,000022 * \lambda^6 \quad (17)$$

Les caractéristiques du générateur éolien utilisé sont telles que :

Tableau 3 : Caractéristiques du générateur éolien

Modèle	BWC 850
Fabricant	Bergey Windpower
Puissance nominale (W)	850
Vitesse nominale	45 km/h
Vitesse de rotation (tr/min)	520
Vitesse d'amorçage	8km/h
Diamètre du rotor	2,5m

La modélisation en Matlab/Simulink du générateur éolien est schématisée par la figure12.

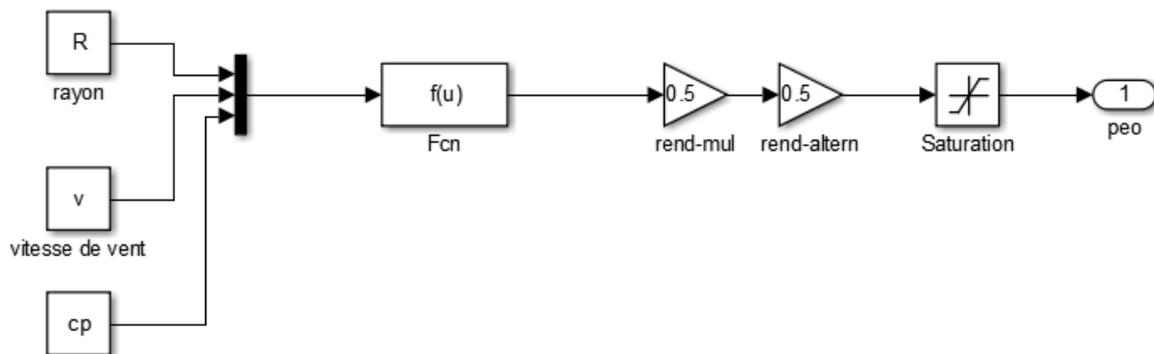


Figure 12 : Schéma en bloc du générateur éolien.

$C_p$ , coefficient de puissance ;  $v$ , vitesse de vent ;  $R$ , rayon de la turbine étaient les paramètres caractéristiques pour déterminer la puissance d'une éolienne. La fonction  $f(u)$  n'est que l'expression de leur puissance.

### 2.3 Groupe électrogène :

Le groupe électrogène utilisé dans ce travail de mémoire est un groupe diesel.

Il existe plusieurs façons de modéliser le générateur diesel mais la plus simple consiste en la simulation en rendant linéaire la consommation en fonction de la puissance nominale du générateur.

La modélisation en Matlab/Simulink du Générateur Diesel est donnée par la figure 13.

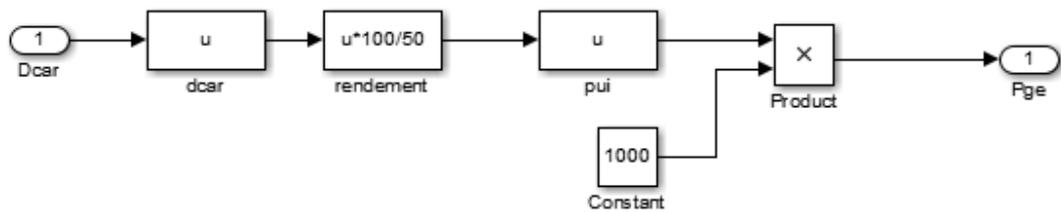


Figure 13 : Schéma bloc du générateur diesel

Le groupe que nous allons choisir porte les caractéristiques suivantes :

Tableau 4 : Caractéristique du générateur diesel

Puissance nominale	800W
Consommation de carburant	1 Litre/h
Rendement	50%

## 2.4 Microcontrôleur

Dans ce travail de mémoire le bloc de microcontrôleur est la base du circuit de commutation. Ainsi dans la pratique, il est peut être relié à un capteur de courant électrique (souvent le capteur à Effet Hall) qui détecte et mesure le courant dont la charge en a besoin. Le microcontrôleur choisit alors la source d'énergie correspondant à cette charge.

Nous montrons sur la figure 14 le schéma synoptique du fonctionnement du bloc de commutateur (microcontrôleur) lors du contrôle du système multisource dans cette étude.

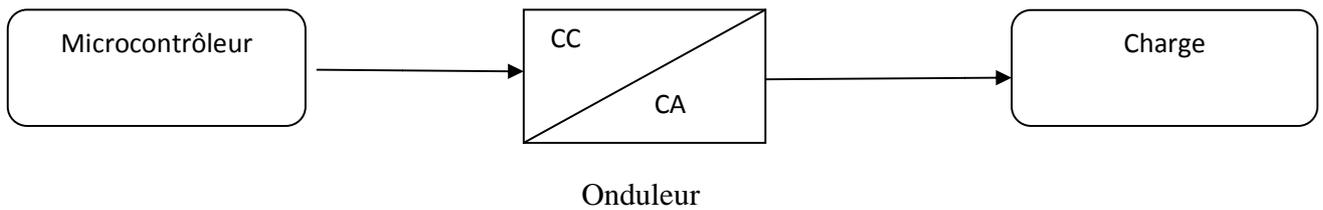


Figure 14 : Schéma synoptique du commutateur.

Le bloc microcontrôleur est modélisé par Matlab/Simulink comme le montre la figure 15.

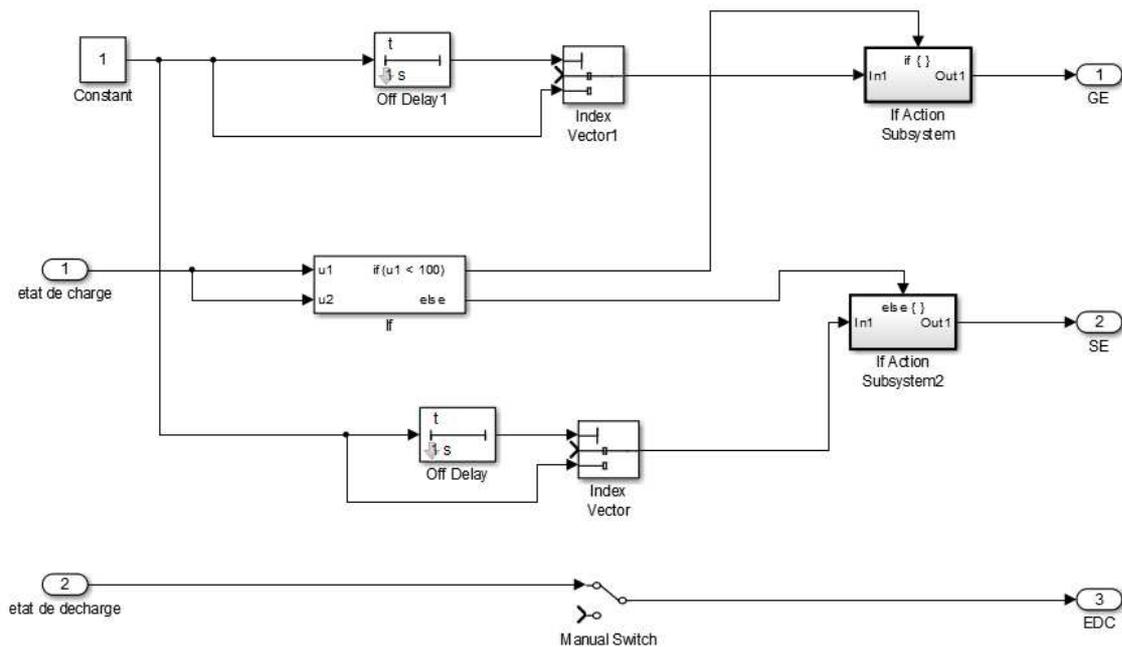


Figure 15 : Schéma en bloc du microcontrôleur.

En fonction de l'état de la charge de la batterie est la mise en marche du groupe électrogène, c'est-à-dire pendant que la batterie en charge, le groupe intervient, le système commande permet d'afficher leur état de charge et de décharge. Ainsi, nous avons comme paramètre de ce modèle l'état de charge et de décharge de la batterie.

## 2.5 Batterie d'accumulateurs :

Rappelons qu'un élément est un couple électrochimique c'est-à-dire deux électrodes dans une solution. Une batterie d'accumulateur est une association de plusieurs éléments en série ou en parallèle pour obtenir une tension nominale souhaitée.

Le modèle mathématique traduisant le phénomène physico-chimique gouvernant le fonctionnement des batteries est très complexe, c'est pourquoi dans notre étude nous allons choisir d'utiliser le modèle d'accumulateur CIEMAT ayant décrit par les équations suivantes leur phénomène (charge et décharge de la batterie).

L'équation de la tension au cours de la décharge et la charge de la batterie est respectivement la suivante [6] :

$$V_{decharge} = n * E - n * R * I \quad (18)$$

$V_{decharge}$  : tension aux bornes de la batterie lors de la décharge

$n$  : nombre d'éléments en série

$E$  : force électromotrice de la batterie

$R$  : résistance interne de la batterie

$I$  : intensité de la batterie

(19)

$$V_{charge} = n * E + n * R * I$$

$V_{charge}$  : tension aux bornes de la batterie en charge.

La réaction chimique à l'intérieur de la batterie est fonction de la température, donc la capacité d'énergie stockée est en rapport avec celle-ci, et aussi de courant moyen de décharge :

$$C = C_{10} * \frac{1,67}{1 + 0,67 * \left(\frac{I}{I_{10}}\right)^{0,9}} * (1 + 0,005 * \Delta T) \quad (20)$$

$C$  : capacité de la batterie

$I$  : courant moyen de décharge

$I_{10}$  : Intensité de décharge en 10h

$C_{10}$  : Capacité de décharge en 10h

$\Delta T$  : échauffement de l'accumulateur (ici identique pour tous les éléments)

L'état de charge de la batterie est défini comme suit :

$$EDC = 1 - \frac{Q}{C} \quad (21)$$

Q : quantité de la charge manquante de la batterie

L'évolution de cette charge en fonction du temps sera formulée:

$$Q = I_{batterie} * t \quad (22)$$

$I_{batterie}$  : Intensité de la batterie

t : temps

Compte tenu l'équation (19), (20), (21), l'équation de la décharge de la batterie devient :

$$V_{bat-dec} = n[1,965 + 0,12 * EDC] * -n * \left[ \frac{I_{batterie}}{C_{10}} \right] * \left( \frac{4}{(1+I_{batterie})^{1,3}} + \frac{0,27}{EDC^{1,5}} + 0,02 \right) (1 - 0,007 * \Delta T) \quad (23)$$

$V_{bat-dec}$  : tension de la batterie déchargée

Et l'équation de charge :

$$V_{bat-charg} = n[2 + 0,16 * EDC] * -n * \left[ \frac{I_{batterie}}{C_{10}} \right] * \left( \frac{6}{(1+I_{batterie})^{1,3}} + \frac{0,27}{(1-EDC)^{1,2}} + 0,036 \right) (1 - 0,025 * \Delta T) \quad (24)$$

$V_{bat-charg}$  : tension de la batterie en charge

Ici, nous avons utilisé les batteries ayant des spécifications suivantes :

Tableau 5 : Caractéristique de la batterie d'accumulateur

Type	Plomb-acide
Tension nominale	24 V (12 éléments en série)
Capacité nominale	45Ah
Profondeur de décharge	0.75
Température d'échauffement	20°C

## 2.6 Système hybride électrique

### 2.6.1 Structure générale du système

La structure du système hybride (éolienne/photovoltaïque/générateur diesel) se distingue à travers son principe de fonctionnement ainsi qu'à travers les différentes sources utilisées et la présence ou non des éléments de stockage. Il existe deux principes de fonctionnement du système :

- Le premier principe est destiné à faire fonctionner une à une les trois sources. Sa gestion est contrôlée par un commutateur en fonction des conditions météorologiques.
- Le second principe consiste à additionner deux sources (éolienne/photovoltaïque) et à les stocker dans des accumulateurs. La troisième source (générateur diesel) est utilisée comme générateur de secours si la batterie est en charge.

Ici, nous allons choisir le second principe. En effet, il est plus rentable par rapport au premier, le vent étant disponible que ce soit la nuit ou le jour et le soleil n'étant disponible que de 8 à 18h en moyenne par jour. Alors, pour pouvoir exploiter les deux à la fois, il est nécessaire de les associer afin de maximiser l'exploitation des potentiels disponibles du site.

### 2.6.2 Structure du système

Le schéma de la structure du système hybride étudié est indiqué sur la figure 16.

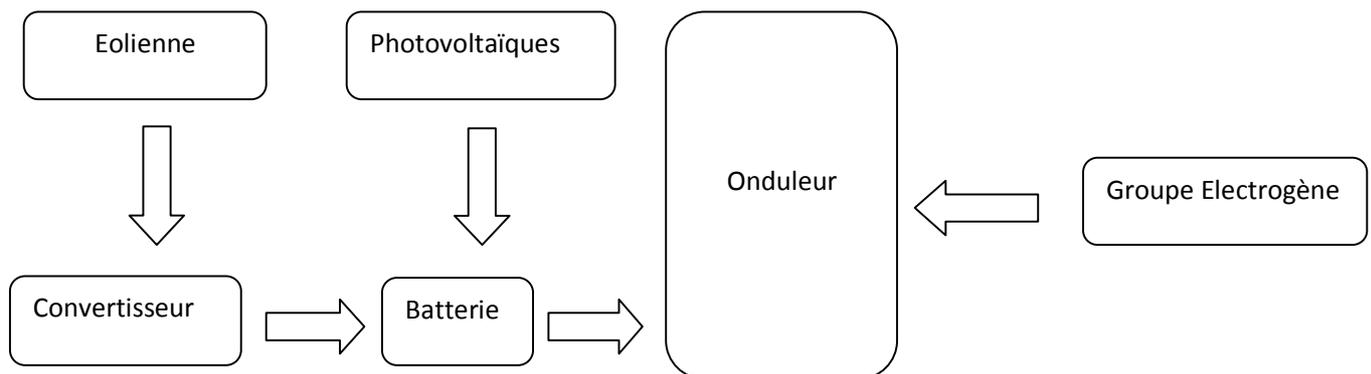


Figure 16 : Structure du système hybride.

### 2.6.3 Principe de fonctionnement

La charge est alimentée par les batteries (éoliennes et solaires). Si les batteries sont en charge, le générateur diesel intervient. La gestion des puissances produites de différentes sources est illustrée sur l'organigramme de la figure 17.

Les significations de chaque terme utilisé sur l'organigramme de la figure 18 sont les suivantes :

Es : l'éclairement solaire sur le plan des panneaux,

Vv : la vitesse du vent,

: la puissance appelée par la charge,

Cc : la capacité de carburant du groupe électrogène,

: la puissance produite par le générateur photovoltaïque et le générateur éolien,

: la puissance produite par le générateur diesel,

SE : ce terme est utilisé pour caractériser la batterie,

Ge : celui pour caractériser le groupe électrogène

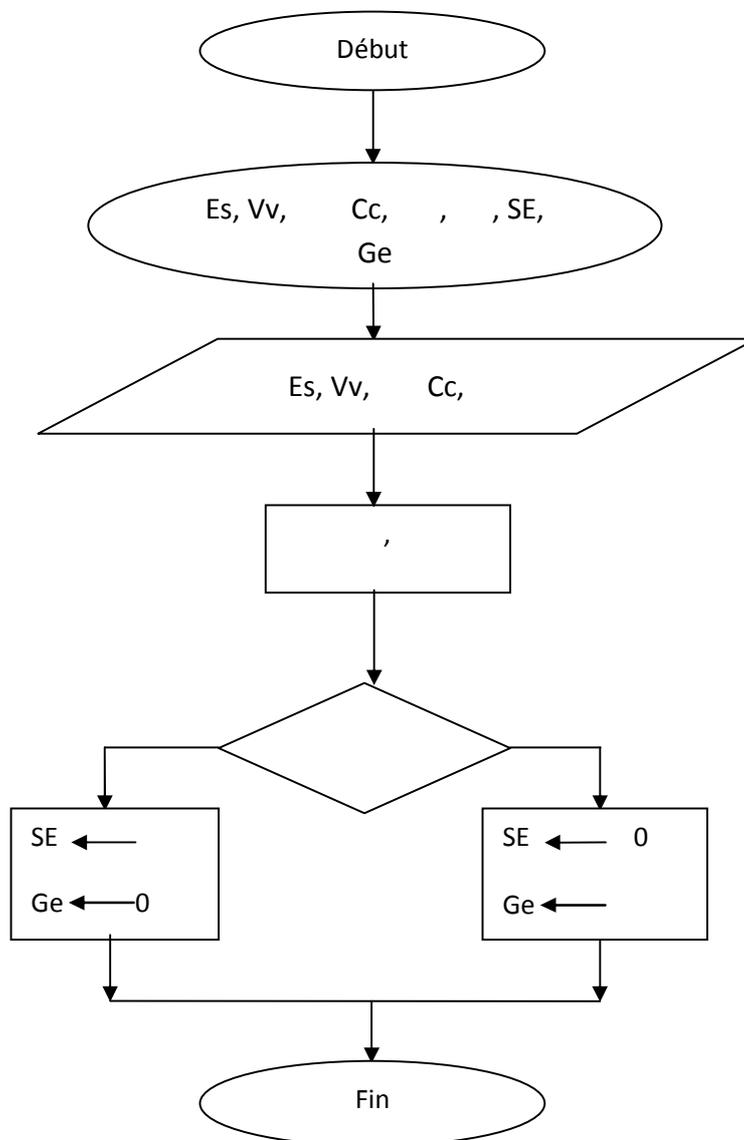


Figure 17 : Organigramme de la gestion des sources.

Pour tester le fonctionnement du modèle du système hybride étudié, nous avons utilisé les valeurs indiquées dans les tableaux 6, 7,8.

Tableau 6 : Vitesse moyenne journaliere.

Mois	jan	fév.	mar.	av.	mai	juin	juil.	aout	sept	oct.	nov.	déc.
Vitesse du vent [m/s]	3,1	3,1	3,1	2,8	2,5	2,5	3,1	3,4	3,4	3,4	3,1	2,8

Tableau 7 : Eclairment solaire moyenne journaliere.

Mois	jan	fév.	mar.	av.	mai	juin	juil.	aout	sept	oct.	nov.	déc.
Éclairment solaire [kWh/m <sup>2</sup> /j]	5,22	5,08	4,77	4,33	3,81	3,48	3,51	4,18	5,10	5,68	5,65	5,42

Tableau 8 : Consommation électrique journaliere.

Appareils électriques	Fonctionnement [h]	Nombre	Puissance [w]	Consommation [Wh]
Radio	7	2	60	540
Lampes	4	5	5	100
TV couleur	5	1	80	400

Tableau 9 : Profil de charge journaliere.

Heures	Consommation [w]	Heures	Consommation [w]
00 :00-01 :00	0	12:00-13 :00	0
01 :00-02 :00	0	13 :00-14 :00	0
02 :00-03 :00	0	14 :00-15 :00	50
03:00-04:00	0	15 :00-16 :00	50
04 :00-05:00	10	16 :00-17 :00	0
05 :00-06 :00	80	17:00-18 :00	0
06 :00-07 :00	80	18 :00-19 :00	0
07 :00-08 :00	50	19:00-20 :00	90
08 :00-09 :00	50	20 :00-21 :00	90
09 :00-10 :00	50	21 :00-22 :00	90
10 :00-11 :00	50	22 :00-23 :00	0
11 :00-12 :00	50	23 :00-24:00	0

Les tableaux 6,7 concernent les données météorologiques du site Antananarivo Madagascar, disponible sur le logiciel retscreen, 2016. Quant aux tableaux 8 et 9, représentent respectivement la consommation journalière et le profil de charge utilisé.

#### 2.6.4 Modélisation en Matlab/Simulink d'un système hybride

La figure 18 montre le schéma en bloc du principe général du fonctionnement d'un système hybride.

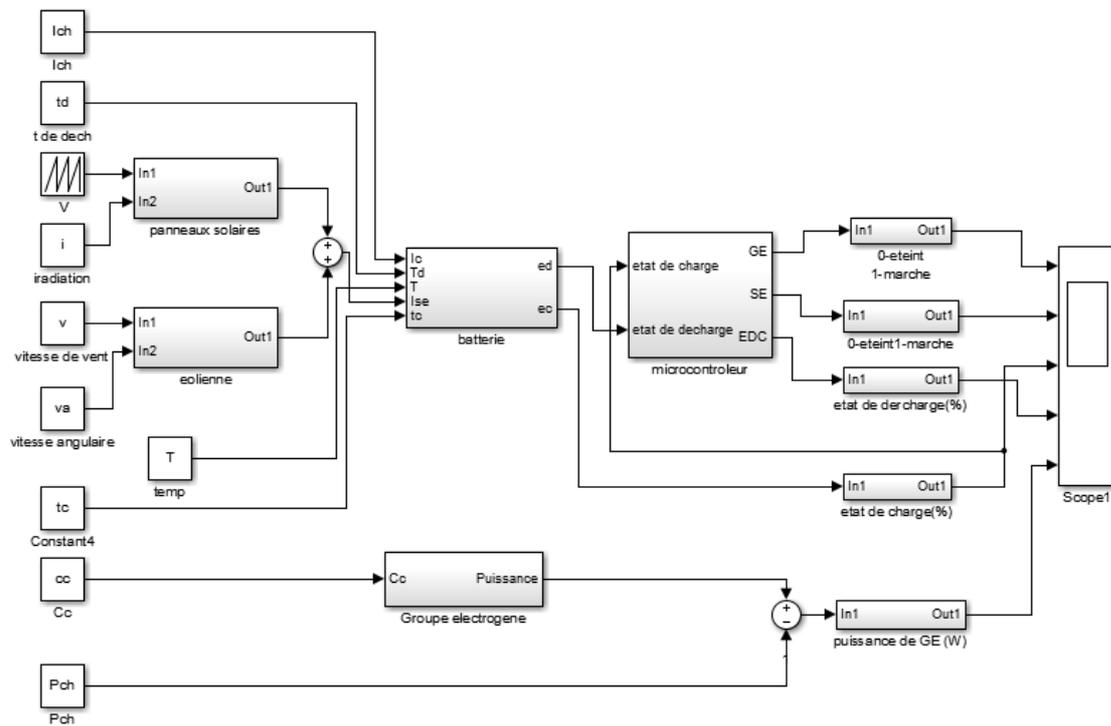


Figure 18 : Schéma en bloc du principe général du système hybride

Nous avons introduit différents paramètres pour cette modèle qui sont :

L'intensité de décharge,  $I_{ch}$  ; le temps de décharge,  $t_d$  ; la tension du système photovoltaïque  $V$  ; l'irradiation solaire  $i$  ; la vitesse de vent  $v$ , la vitesse angulaire de rotor  $va$  ; la température d'échauffement de la batterie d'accumulateur  $T$  ; le temps de charge  $t_c$  ; la capacité de carburant  $C_c$  la puissance de la charge  $P_{ch}$  . Nous avons obtenus l'état de charge de la batterie afin de contrôler leur état de décharge et de gérer le groupe si nécessaire.

## 2.7 Etude du rayonnement solaire

### 2.7.1 Paramètre caractéristique du rayonnement solaire :

A titre de connaissance le rayonnement solaire est défini par :

- Déclinaison solaire

La position du soleil par rapport à l'équateur est repérée par sa déclinaison définie par l'équation :

$$\delta = 23,45 * \sin \left( \frac{2\pi}{365} (N - N_0) \right) \quad (25)$$

$\delta$  : déclinaison solaire

$j$  : numéro du jour de l'année (compté à partir du 1<sup>er</sup> Janvier)

- Angle horaire

L'angle horaire  $\omega$  désigne la position du soleil par rapport à l'axe polaire pendant son déplacement d'Est vers l'Ouest. Sa valeur est augmentée de 15° par heure et conventionnellement dans l'hémisphère Sud, il vient :

- $\omega=0$  à midi,
- $\omega$  : négatif le matin,
- $\omega$  : positif l'après-midi.

Exceptionnellement, l'angle horaire du soleil à son coucher est tel que :

$$\cos\omega_s = -\tan\psi * \tan\delta \quad (26)$$

$\omega_s$  : l'angle horaire du soleil à son coucher [°C],

$\Psi$  : la latitude du site.

- Indice de clarté

L'indice de clarté  $K_T$  est défini par le rapport :

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (27)$$

$H$  : le rayonnement global sur le plan horizontal,

$H_0$  : le rayonnement extraterrestre s'exprimant par la relation :

$$H_0 = \frac{86400}{\pi} * GSC \left( 1 + 0,33 * \cos\left(\frac{2 * \pi * n}{365}\right) \right) \\ (\cos\psi * \cos\delta * \sin\omega_s + \omega_s * \sin\psi * \sin\delta) \quad (28)$$

$GSC$  : la constante solaire (1367W/m<sup>2</sup>).

### 2.7.2 Rayonnement incident sur le plan incliné

Pour estimer la valeur du rayonnement incident sur le plan incliné à partir des données concernant le plan horizontal, la valeur du rayonnement diffus et direct horizontal est nécessaire. Si cela n'est pas disponible, ils peuvent être déterminés par les équations suivantes :

Le rayonnement diffus sur le plan horizontal est déterminé à partir de la valeur de l'indice de clarté  $K_T$ .

- Si  $K_T$  est inférieur à 0,21 :

$$H_d = H(0,995 - 0,081 * K_T) \quad (29)$$

$H$  : l'ensoleillement global qui frappe le plan horizontal [ $W/m^2$ ]

- Si  $K_T$  est entre 0,21 et 0,76 :

$$H_d = H(0,724 + 2,738 * K_T + 8,32 * K_T^2 + 4,967 * K_T^3) \quad (30)$$

- Si  $K_T$  est supérieur à 0,76 :

$$H_d = 0,21 \quad (31)$$

Le rayonnement direct sur le plan horizontal est défini par :

$$H_b = H - H_d \quad (32)$$

$H_b$  : Rayonnement direct sur le plan horizontal [ $W/m^2$ ]

Le rayonnement global horaire  $G$  qui frappe un plan incliné est exprimé par la relation suivante :

$$G = H_b * R_b + H_d \left(1 + \frac{\cos\alpha}{2}\right) * H_b * a \left(1 - \frac{\cos\alpha}{2}\right) \quad (33)$$

$$R_b = \frac{\cos\alpha_i}{\cos\theta} \quad (34)$$

$$\cos\alpha_i = \cos\theta * \cos\alpha + \sin\alpha * \sin\theta * \cos(\Phi - \gamma) \quad (35)$$

$$\tan\Phi = \left(\frac{\sin\omega}{\cos\omega * \sin\psi - \tan\delta * \cos\psi}\right) \quad (36)$$

$$\theta = 90 - h \quad (37)$$

$$\sinh = \sin\psi * \sin\delta + \cos\psi * \cos\delta * \cos\omega \quad (38)$$

$\alpha_i$  : l'angle d'incidence de l'irradiation solaire sur le module photovoltaïque,

$\alpha$  : l'angle d'inclinaison du module photovoltaïque,

$\theta$  : l'angle zénithal du soleil,

$\Phi$  : l'azimut du soleil,

a : l'albédo du sol,

$\gamma$  : L'orientation du module solaire,

h : la hauteur du soleil. Nous tenons à faire remarquer que dans notre étude, le rayonnement global est donné.

## CHAPITRE 3 :

### RESULTATS ET INTERPRETATION

Nous avons simulé le fonctionnement du système hybride comportant un générateur photovoltaïque associé à un générateur éolien avec comme système d'appoint un groupe électrogène de puissance fixe et égale à 800W. Nous rapportons dans la suite les résultats ainsi obtenus.

#### 3.1 Puissance produite par le générateur éolien et le générateur photovoltaïque.

La puissance produite par le générateur éolien lors du fonctionnement du système hybride est présentée sur le tableau 10. Nous constatons à travers ce tableau que la puissance fournie est une fonction croissante de la vitesse tant que la vitesse limite n'est pas atteinte. Les résultats obtenus correspondent à une vitesse du vent pas trop élevée qui correspond aux régions des hauts plateaux.

Quant à la puissance produite par le générateur photovoltaïque, elle est indiquée sur le tableau 11. Nous voyons que la puissance produite par le générateur photovoltaïque croît linéairement avec le rayonnement solaire disponible.

Tableau 10 : Puissance produite par le générateur éolien.

Vitesse de vent [m/s]	2,5	2,8	3,1	3,4
Puissance électrique [W]	0	0	100	102

Tableau 11 : Puissance produite par le générateur photovoltaïque.

Éclairement [kWh /m <sup>2</sup> /j]	3,48	3,51	3,81	4,18	4 ,33	4,77	5 ,08	5,10	5,22	5,42	5,65	5,68
Puissance [W]	887.4	895	971	1065.9	1104	1216	1295	1277	1331	1382	1440	1448

### 3.2 Résultats visualisés sur l'oscilloscope.

Durant la modélisation, nous avons varié la dimension des panneaux solaires pour pouvoir connaître le point de fonctionnement optimal de ce système. En premier lieu, nous avons utilisé 2 panneaux solaires délivrant une puissance de 255W dans des conditions STC; un petit éolien fonctionnant à une vitesse de vent de 3m/s et ayant une puissance nominale de 850W et un groupe électrogène capable de produire une puissance nominale de 800W, 2 batteries d'accumulateurs de capacité nominale de 45 Ah chacune. A une énergie solaire de 1000Wh et à une énergie éolienne de 500Wh, nous avons essayé de voir le temps de fonctionnement du groupe en fonction de l'état de charge de la batterie. Nous avons estimé que la puissance dissipée par la charge était de 190 W. La figure 19 représente à la fois l'évolution temporelle de l'état de charge de la batterie, la puissance disponible sur le groupe électrogène, ainsi que l'état de décharge de la batterie connectée à une charge de 3.75A pendant 10h de fonctionnement.

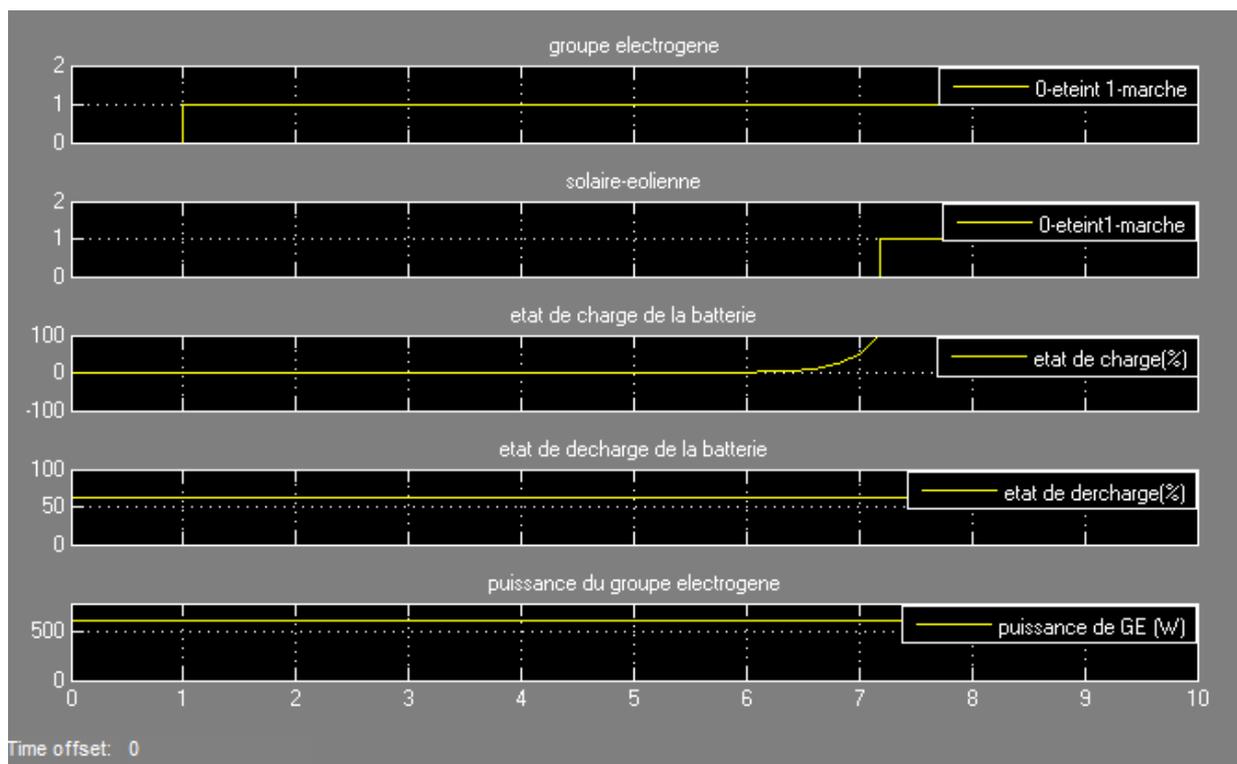


Figure19 : État de décharge de la batterie pendant 10h.

Nous voyons sur la figure 19 l'évolution temporelle de l'état de charge de la batterie qui est proportionnelle au temps de fonctionnement du groupe électrogène. Nous en concluons que le temps de fonctionnement du groupe électrogène est très long, cela veut dire que la batterie nécessite encore beaucoup de temps pour se charger. Effectivement, l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont faibles. A propos de l'état de décharge de la batterie, la consommation de la charge est d'environ 1/3 de la capacité de la batterie.

Ensuite nous avons pris les mêmes paramètres mais le temps de fonctionnement est de 20h, nous voyons que seul change le temps de décharge de la batterie.

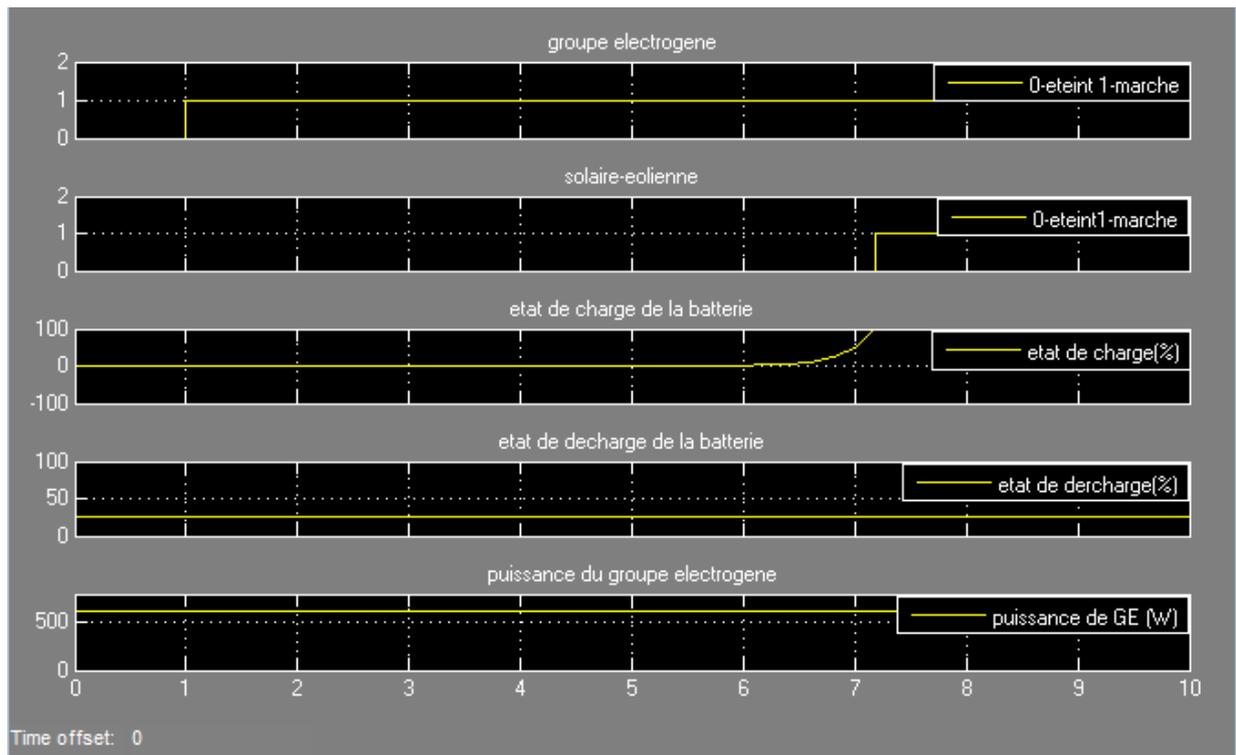


Figure 20: État de décharge de la batterie pendant 20h.

Nous avons les mêmes résultats que précédemment mais l'état de décharge de la batterie est presque  $\frac{2}{3}$  de la capacité nominale. Nous sommes ainsi arrivés au stade de la capacité maximale que peut fournir la batterie (profondeur de décharge = 75%), l'autonomie de la batterie est alors 20h à un courant constant de 3,75A. La diminution du courant moyen de décharge peut avoir ainsi plus d'autonomie pour la batterie.

Nous allons ensuite utiliser 3 panneaux solaires au lieu de deux, tout en utilisant l'énergie éolienne de 500Wh et l'énergie solaire de 1 000Wh et la charge débitée par le groupe reste 190W. Ainsi nous avons comme résultats, ceux présentés sur la figure 21.

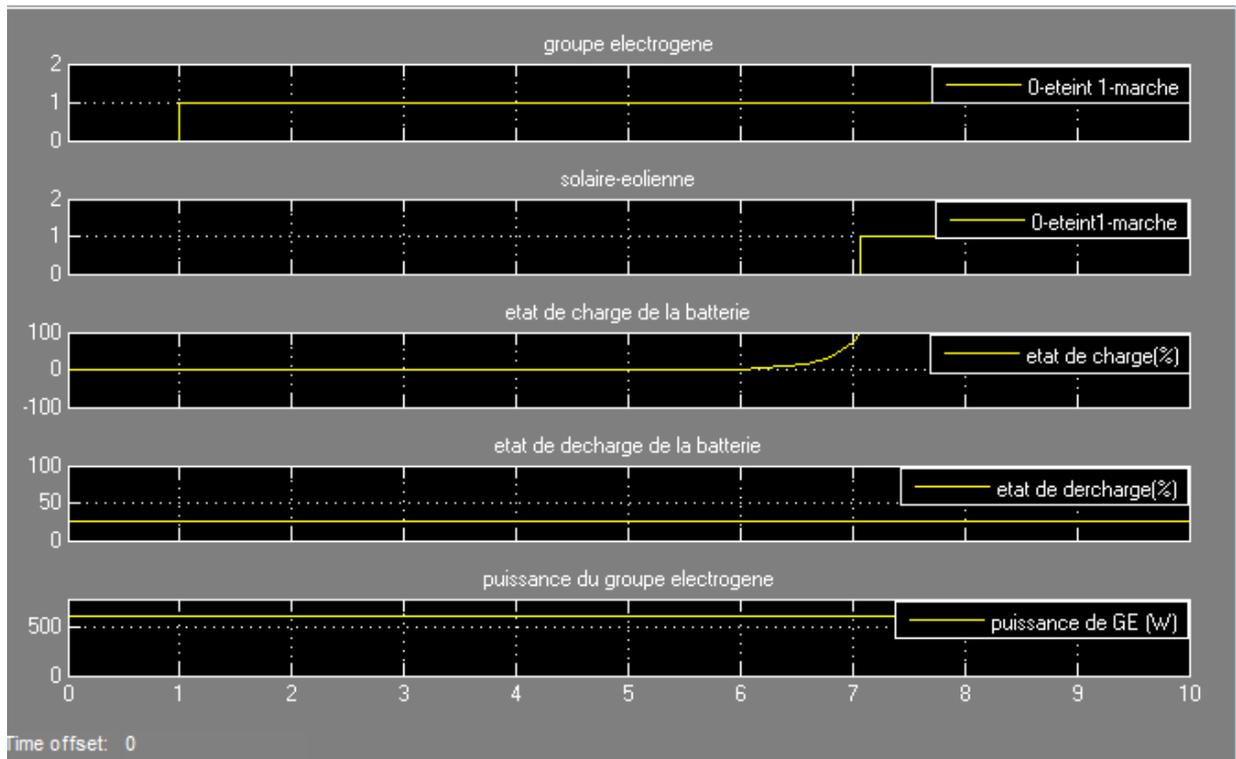


Figure 21: État de charge de la batterie à une énergie solaire de 1000Wh et une énergie éolienne de 500Wh.

La figure 21 montre que nous avons une différence du temps de charge de la batterie par rapport à celui précédent. En effet, le temps de charge de la batterie diminue à cause de la dimension des panneaux solaires. Par conséquent l'énergie disponible sur la batterie augmente. Nous pouvons dire que le dimensionnement est ainsi important pour avoir la condition optimale de ce système.

Nous conservons tous les paramètres précédents, mais seul nous faisons augmenter l'énergie solaire de l'ordre de 2 000Wh et l'énergie éolienne de 1 000Wh, nous avons les résultats présentés sur la figure 22.

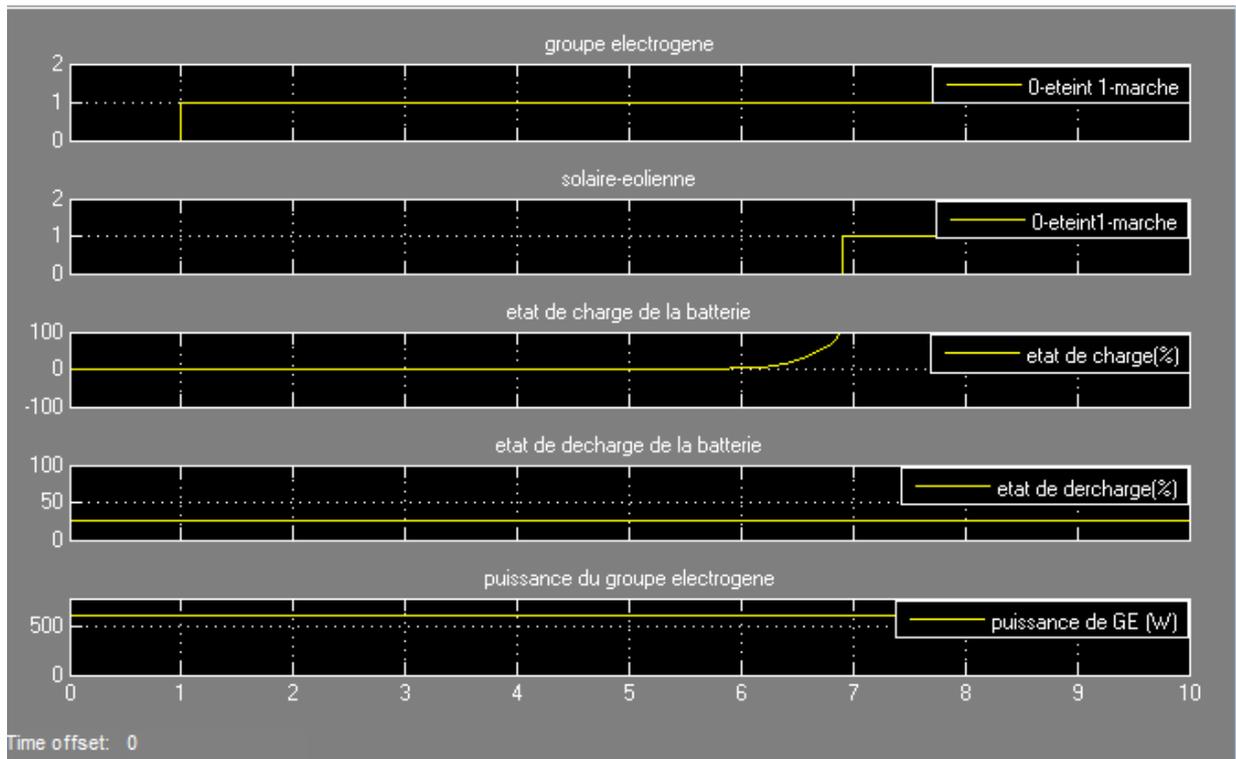


Figure 22 : État de charge de la batterie à une énergie solaire de 2000Wh  
 et une énergie éolienne de 1 000Wh.

Sur la figure 22, nous pouvons dire que l'augmentation de l'énergie solaire et celle de l'énergie éolienne réduisent le temps de charge de la batterie. Nous en déduisons que pendant la période d'été, le temps de charge de la batterie est réduit par rapport à ceux des autres saisons. En conséquence, le groupe électrogène ne fonctionne que de très peu de temps.

## CONCLUSION

Notre travail consiste à étudier le fonctionnement d'un système hybride. Pour cela, des modélisations de chaque composant du système ont été établies avec le logiciel Simulink. Ces modélisations sont nécessaires et primordiales car elles permettent la conception efficace du système à travers les études des résultats ainsi obtenus. Effectivement, ces études visent aussi à valoriser l'exploitation des énergies de sources renouvelables qui sont devenues, actuellement, parmi les principales sources alternatives d'énergie d'approvisionnement.

Dans cette étude, nous testons le fonctionnement de notre système hybride électrique à travers l'évaluation du temps de charge des batteries d'accumulateurs à partir de l'énergie produite par les sources d'énergie renouvelables. Les dimensionnements des appareils ont ainsi des impacts sur ce temps de charge.

Les résultats obtenus montrent que le temps de charge de la batterie est fonction à la fois de l'énergie disponible et du dimensionnement des systèmes utilisés. Et pendant les périodes d'hiver et d'été, nous avons constaté une brusque évolution sur le temps de charge de la batterie.

Les modélisations du fonctionnement du système hybride permettent, donc non seulement, de déterminer les caractéristiques des composants du système, mais aussi de dimensionner les appareils utilisés à partir de la charge débitée. Elles présentent une base pour réaliser une étude expérimentale de ce système hybride. Nous notons que la combinaison des sources d'énergie renouvelables est plus rentable par rapport à l'utilisation de tout système monosource.

Pour les régions isolées, sans accès à l'énergie électrique, la réalisation de ce système constitue une avance considérable vers le développement durable et nécessite dans ce sens une étude bien appropriée et la maîtrise de la gestion de ces sources d'énergie.

## REFERENCES

### Bibliographiques

- [1]. ANNE, Labouret et Al. 1998. Les bases de l'énergie photovoltaïque. pp 30-40.
- [2]. BAGHDADI, Fazia. 2011. Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables. pp 70-95.
- [3]. BESLIN, Guy, MULTON, Bernard.2016. Production d'électricité éolienne : de la caractérisation du gisement éolien aux technologies d'aérogénérateurs.
- [4]. DARIO, Morales.2006.Optimalité des éléments d'un système décentralisé de production d'énergie électrique. pp 70-80.
- [5]. FEDDAOUI, Omar.2013.Contribution à l'étude des systèmes hybrides de génération : application aux énergies renouvelables. pp 01-10.
- [6]. IDIR, Issad et Al.2014.Le 3<sup>ème</sup> séminaire Internationale sur les Energies Nouvelles et Renouvelables.
- [7]. JEAN, Daniel Langlois.2006.Modélisation et étude des performances des systèmes éoliens hors réseau. pp 01-10.
- [8]. MECHALIKH, Med Nadjib, HAMADA, Charaf Eddine.2013. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. pp 01-10.
- [9]. SIBIRI, Judicaël Noël Zongo. 2010. Etude et analyse expérimentale d'une centrale hybride photovoltaïque/groupe électrogène (diesel ou biocarburant) sans stockage. pp 10-20.

### Webographique

- [10]. <http://encyclopedie-energie.org>. [citation:02 septembre 2016]

TITRE : "MODELISATION DU FONCTIONNEMENT D'UN SYSTÈME HYBRIDE  
EOLIEN/SOLAIRE/GROUPE"

**RESUME**

Le présent travail consiste en la modélisation du fonctionnement d'un système hybride solaire/éolien/groupe. Le système utilisé est composé de modules photovoltaïques de puissance crête de 255W, d'un petit éolien de puissance nominale de 850W, d'un groupe électrogène capable de délivrer une puissance de 800W et d'une batterie d'accumulateurs de 45Ah. Lors de cette étude, nous montrons que pendant que la batterie est en charge le groupe électrogène intervient. Ainsi, nous essayons d'obtenir l'évolution temporelle de l'état de charge de la batterie. Les résultats obtenus montrent que le temps de charge de la batterie est fonction de l'énergie disponible.

Mots clés : système hybride, bus, système photovoltaïque, système éolien, simulation, Simulink.

TITLE: "MODELING THE OPERATION OF A WIND / SOLAR / GROUP HYBRID  
SYSTEM"

**ABSTRACT**

The present work consists in modeling the operation of a solar / wind / group hybrid system. The system used is made up of 255W peak power photovoltaic modules, a small wind turbine rated at 850W, a generator capable of delivering 800W and a 45Ah battery. In this study, we show that while the battery is in charge the generator intervenes. Thus, we try to obtain the time evolution of the state of charge of the battery. The results obtained show that the charge time of the battery is a function of the available energy.

Key words: hybrid system, bus, photovoltaic system, wind system, simulation, Simulink.

Encadreurs :

*RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo*

*Professeur Titulaire*

*RASAMIMANANA François de Salle*

*Maître de Conférences*

Impétrante :

RAKOTOMALALA Sabrina Fanantenana

[rsabrinafanantenana@yahoo.fr](mailto:rsabrinafanantenana@yahoo.fr)

Tél : 032 47 601 62

Lot IIS 78 D TER D Anjanahary 101