

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



Université Ibn Khaldoun de Tiaret  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Génie Mécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Énergétique

### Thème

Amélioration des Performances Energétiques  
d'une Centrale Photovoltaïque par l'intégration  
d'un Générateur Diesel

### Préparé par :

- KHALAFI Sid Ahmed
- KASSI Rachid

Soutenu publiquement le : 29 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M. Baltach Abdelghani	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. Moulgada abdelmajid	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. Bouzouini Mohamed	Maître assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. Negadi Karim	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

# Dédicaces

**J**e dédie ce modeste travail :

- À mes très chers parents.
- À Mes frères et sœurs.
- Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études.

*/ KHALAFI Sid Ahmed*

**J**e dédie ce modeste travail :

- À mes très chers parents.
- Mes frères et sœurs.
- Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études.

*/ KASSI Rachid*

# Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui que ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur KARIM NEGADI, maître de conférences à l'Université IBN KHALDOUN de Tiaret. Nous lui sommes très reconnaissants pour accepter de nous encadrer et pour ces orientations et son soutien.

Ce travail a été réalisé dans le laboratoire de Génie Énergétique et Génie informatique, université Ibn Khaldoun de Tiaret.

Nous tenons à remercier vivement le professeur Tayeb ALLAOUI, directeur du laboratoire L2GEGI pour nous avoir permis de réaliser ce travail au sein du laboratoire.

Nous remercions les membres de jury qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir juger et examiner notre travail.

Enfin, nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

# Sommaire

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

## **Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables**

1.1. Introduction.....	4
1.2. Énergie renouvelable .....	4
1.3. Les différents types d'énergie renouvelable.....	5
1.3.1. Énergie éolienne.....	5
1.3.1.1. Définition.....	5
1.3.1.2. Principe de fonctionnement.....	5
1.3.1.3. Les différents types d'éoliennes.....	5
1.3.2. Énergie hydraulique.....	9
1.3.2.1. Définition.....	9
1.3.2.2. Principe de fonctionnement.....	9
1.3.2.3. Les types de l'énergie hydraulique.....	10
1.3.3. Biomasse.....	11
1.3.3.1. Définition.....	11
1.3.3.2. Principe de fonctionnement.....	11
1.3.3.3. Les types de biomasse.....	12
1.3.4. Énergie géothermique.....	12
1.3.4.1. Définition.....	12
1.3.4.2. Principe de fonctionnement.....	13
1.3.4.3. Différents types de gisements géothermiques.....	14
1.3.5. Énergie solaire.....	14
1.3.5.1. Définition.....	14
1.3.5.2. Les types de l'énergie solaire.....	15
1.3.5.3. Fonctionnement d'une installation photovoltaïque.....	16
1.4. Énergie solaire photovoltaïque.....	17
1.5. Rayonnement solaire.....	17
1.6. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque.....	18
1.6.1. La cellule photovoltaïque.....	18
1.6.2. Le module photovoltaïque.....	19
1.6.3. Le panneau solaire.....	19
1.7. Les avantages de l'énergie de système photovoltaïque.....	21
1.8. Les inconvénients de l'énergie de système photovoltaïque.....	21
1.9. Conclusion.....	22

## **Chapitre 2 : Différentes configurations des système hybride et modélisation du générateur diesel**

2.1. Introduction.....	24
2.2 Systèmes hybrides.....	24
2.2.1 Définition.....	24
2.3. Importance de l'hybridation.....	24
2.4. État de l'art sur les systèmes hybrides .....	25

2.5. Classification.....	26
2.5.1. Le régime du fonctionnement.....	26
2.5.2. La structure du système hybride.....	27
2.6. Avantages et inconvénients d'un système hybride.....	28
2.7. Problématique de la gestion d'énergie électrique.....	28
2.8. Architectures Électriques Des Systèmes Hybrides.....	28
2.8.1. Système avec Bus DC.....	28
2.8.2. Système avec Bus AC.....	30
2.8.3. Systèmes Mixtes avec Bus DC et AC.....	31
2.9. Structure du système hybride.....	32
2.10. Les différents types des configurations.....	32
2.10.1. Configuration PV/Diesel série.....	33
2.10.2. Configuration PV/Diesel commuté.....	33
2.10.3. Configuration PV/Diesel parallèle.....	34
2.10.4. La configuration Flexy Energy.....	35
2.11. Modélisation du générateur Diesel.....	36
2.12. Modélisation mathématique de GSAP.....	41
2.12.1. Hypothèses simplificatrices.....	41
2.12.2. Description mathématique de GSAP.....	41
2.13. Conclusion.....	45

### **Chapitre 3 : Simulation d'un système de production photovoltaïque associé à un générateur diesel**

3.1. Introduction.....	47
3.2. Modélisation d'un module photovoltaïque.....	47
3.2.1. Modélisation d'une cellule solaire.....	47
3.2.2. Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire.....	49
3.3. Impact de l'électronique de puissance dans la gestion énergétique.....	50
3.3.1. Convertisseur statique.....	50
3.3.1.1. Les convertisseur DC-DC.....	51
3.3.1.2. Les hacheurs.....	51
3.3.1.3. Convertisseur DC-AC (onduleur).....	51
3.3.1.4. Convertisseur AC-DC (redresseur).....	52
3.3.2. Charges.....	52
3.4. Système de stockage.....	52
3.5. Simulation.....	53
3.5.1. Couplage et gestion du système.....	53
3.5.1.1. Description du système couplé et son fonctionnement.....	53
3.6. Résultats et interprétation.....	55
3.7. Conclusion... ..	63
Conclusion générale.....	65

# Liste des figures

## Chapitre 1

<b>Figure 1.1</b> : Les différents types d'énergie renouvelable.....	4
<b>Figure 1.2</b> : Énergie éolienne.....	5
<b>Figure 1.3</b> : Principaux éléments d'une éolienne.....	6
<b>Figure 1.4</b> : Éoliennes à axe horizontal.....	7
<b>Figure 1.5</b> : Éoliennes domestiques.....	8
<b>Figure 1.6</b> : Éoliennes à axe vertical.....	8
<b>Figure 1.7</b> : Énergie hydraulique.....	9
<b>Figure 1.8</b> : Principe de central hydraulique.....	10
<b>Figure 1.9</b> : Biomasse.....	11
<b>Figure 1.10</b> : Principe de centrale biomasse.....	12
<b>Figure 1.11</b> : Énergie géothermique.....	13
<b>Figure 1.12</b> : Centrale géothermique.....	14
<b>Figure 1.13</b> : Énergie solaire thermique.....	15
<b>Figure 1.14</b> : Énergie photovoltaïque.....	16
<b>Figure 1.15</b> : Présentation schématique d'une cellule solaire.....	18
<b>Figure 1.16</b> : Module photovoltaïque.....	19
<b>Figure 1.17</b> : Panneau solaire.....	20
<b>Figure 1.18</b> : Schéma simplifié d'un système PV.....	21

## Chapitre 2

<b>Figure 2.1</b> : Architecture des systèmes hybrides d'énergie (SHE).....	26
<b>Figure 2.2</b> : Classification des systèmes hybrides.....	27
<b>Figure 2.3</b> : Schéma système avec Bus DC.....	29
<b>Figure 2.4</b> : Schéma système avec Bus AC.....	31
<b>Figure 2.5</b> : Schéma systèmes Mixtes avec Bus DC et AC.....	31
<b>Figure 2.6</b> : Schéma synoptique du système d'énergie PV/Diesel série.....	32
<b>Figure 2.7</b> : Schéma synoptique du système d'énergie PV/Diesel commuté.....	34
<b>Figure 2.8</b> : Schéma synoptique du système d'énergie PV/Diesel parallèle.....	35
<b>Figure 2.9</b> : Architecture générale des centrales Flexy Energy.....	36
<b>Figure 2.10</b> : Schéma bloc d'un générateur Diesel avec ses contrôleurs.....	40
<b>Figure 2.11</b> : Régulation de vitesse d'un générateur Diesel avec de courbes de statisme (gauche) et en mode isochrone (droite).....	40
<b>Figure 2.12</b> : Le système triphasé dans le plan complexe.....	41

## Chapitre 3

<b>Figure 3.1</b> : Cellule solaire idéale.....	47
<b>Figure 3.2</b> : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	48
<b>Figure 3.3</b> : Caractéristique $I=f(V)$ .....	49
<b>Figure 3.4</b> : Caractéristiques tension-courant du générateur photovoltaïque.....	50

<b>Figure 3.5 :</b> Caractéristiques tension-puissance du générateur photovoltaïque.....	50
<b>Figure 3.6 :</b> Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	51
<b>Figure 3.7 :</b> Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.....	52
<b>Figure 3.8 :</b> Symbole d'un convertisseur AC-DC.....	52
<b>Figure 3.9 :</b> Schéma simulink global de la chaîne de production photovoltaïque associée à un générateur diesel.....	54
<b>Figure 3.10 :</b> Schéma simulink du générateur photovoltaïque avec un régulateur de tension boost et un onduleur de tension à deux niveaux couplés à une batterie de stockage.....	54
<b>Figure 3.11 :</b> Schéma simulink du générateur diesel (moteur diesel et génératrice synchrone)....	55
<b>Figure 3.12 :</b> Le courant triphasé de la charge.....	56
<b>Figure 3.13 :</b> La tension de la charge.....	56
<b>Figure 3.14 :</b> La tension du bus continu.....	57
<b>Figure 3.15 :</b> irradiation solaire.....	57
<b>Figure 3.16 :</b> La puissance du générateur PV.....	58
<b>Figure 3.17 :</b> Le coutant du générateur PV.....	58
<b>Figure 3.18 :</b> La tension du générateur PV.....	58
<b>Figure 3.19 :</b> La puissance du générateur diesel.....	59
<b>Figure 3.20 :</b> Courant du générateur diesel .....	59
<b>Figure 3.21 :</b> La tension du générateur diesel.....	60
<b>Figure 3.22 :</b> Le couple du générateur diesel.....	60
<b>Figure 3.23 :</b> La vitesse rotorique du générateur diesel.....	60
<b>Figure 3.24 :</b> Le courant de la batterie.....	61
<b>Figure 3.25 :</b> SOC.....	61
<b>Figure 3.26 :</b> La distribution d'énergie (charge, PV, diesel et batterie).....	62

# Nomenclature

$P_{GD}(i)$  : Puissance produit par le GD à l'instant  $i$  [KW]

$H(i)$  : Consommation horaire de chaleur [kcal/h]

$q_{GD}(i)$  : La consommation en carburant de GD à l'instant  $i$  [l/h]

$\alpha, \beta$  : Constantes caractéristiques du générateur diesel [l/kWh]

$P_{GD}(t)$  : La puissance générée par le générateur diesel à un instant  $t$  donné (KW)

$P_{GD.nom}$  : Puissance nominale du générateur diesel [KW]

$I_{GD}(t)$  : Courant fourni par un générateur diesel à un instant (A)

$U_{GD.nom.AC}$  : Tension nominale (V)

$\cos(\varphi)$  : Facteur de puissance du générateur Diésel

$I_{GD \max}$  : Intensité maximale du générateur diesel

$x_{GD}(t)$  : Taux de charge (exprimée en pourcentage de sa puissance nominale) à un instant  $t$

$u_{\alpha\beta}$  : Tensions statoriques (V)

$R_s$  : Résistance statorique ( $\Omega$ )

$L_s$  : L'inductance statorique (H)

$i_{\alpha\beta}$  : Courants statoriques (A)

$E_{\alpha\beta}$  : Forces électromotrices

$\omega_r$  : Vitesse rotorique (rad/s)

$\theta$  : Position de rotor

$\Phi_{pm}$  : Flux magnétique

$n_p$  : Nombre de pair de pôle

$I_m$  : Courant maximal (A)

$V_m$  : Tension maximal (V)

$P_m$  : Puissance maximal (W)

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit (A)



$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert (V)

$R_s$  : Résistance série en ( $\Omega$ )

$R_{sh}$  : Résistance shunt en ( $\Omega$ )

$E$  : Ensoleillement ( $W/m^2$ )

$I_{ph}$  : Photo courant (A)

$I_D$  : Courant de diode (A)

## **Abréviations**

**PV** : Photovoltaïque

**GPV** : Générateur photovoltaïque

**PPM** : Point de puissance maximale

**CA** : Courant alternatif

**CC** : Courant continu

**MPPT** : Point d'extraction de maximum de puissance

**SHE** : Systèmes hybrides d'énergie

**GD** : Génératrice diesel

**GSPA** : Génératrice synchrone à aimants permanents

**SE** : Stockage d'énergie

**SSE** : Systèmes de stockage d'énergie

**SOC** : Etat de charge de la batterie

**WT** : Wind turbine

**PAC** : Pompe à chaleur

**AC** : Alternatif courant

**DC** : Direct courant

# **Introduction générale**



### Introduction générale

La demande croissante en énergie et l'appauvrissement des énergies fossiles impliquent de trouver de nouvelles sources d'énergie propres et durables. Les énergies renouvelables, notamment d'origine solaire et éolienne, pourraient répondre à cette attente. Des systèmes permettant la conversion de l'énergie solaire ou éolienne en énergie électrique utilisable prennent une part de plus en plus grande même si elle reste mineure par rapport à l'électricité produite par les centrales thermiques et nucléaires. Les systèmes de conversion sont divers, ils peuvent être reliés au réseau, ou bien alimenter un dispositif sur un site isolé. Les sources d'énergies renouvelables ont l'avantage d'être gratuites et inépuisables mais présentent une intermittence qu'il est nécessaire de pallier avec un dispositif de stockage de l'énergie électrique, qui doit également être adapté à la restitution de l'énergie électrique à travers la charge utilisée.

La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. Il existe plusieurs combinaisons de systèmes hybrides, à savoir : éolien-diesel, photovoltaïque-diesel, et éolien-photovoltaïque-diesel. Ces mêmes sources d'énergies peuvent être combinées avec d'autres sources telles que l'énergie hydrauliques. Les méthodes d'évaluation des systèmes hybrides éolien/photovoltaïque autonomes et leurs avantages se sont beaucoup développées ces dernières années. L'optimisation de l'énergie éolienne et photovoltaïque avec un système de stockage (batteries, supercondensateurs), avec ou sans apport de diesel, dépend beaucoup des modèles économiques de chaque système pris séparément (éolien et photovoltaïque).

L'avantage d'un système hybride par rapport à un système pur éolien ou pur photovoltaïque, dépend de beaucoup de facteurs fondamentaux : la forme et le type de la charge, le régime du vent, le rayonnement solaire, le coût et la disponibilité de l'énergie, le coût relatif de la machine éolienne, le champ photovoltaïque, le système de stockage électrochimique et d'autres facteurs d'efficacité. Les systèmes photovoltaïques sont actuellement économiques pour les installations de faibles puissances. Pour les systèmes d'énergie autonomes le coût du stockage représente la plus grande contrainte du coût global du système pour les installations de grandes puissances. Minimiser le coût du stockage et optimiser sa capacité est la raison essentielle de la combinaison des systèmes éolien et photovoltaïque.

Afin d'envisager l'intégration des générateurs diesels dans un dispositif de conversion de l'énergie photovoltaïque, il est intéressant de disposer d'un modèle fiable et accessible permettant de simuler les cycles On/Off de l'énergie électrique et ainsi dimensionner une installation ou tout

## **Introduction générale**

---

simplement statuer sur leur utilité ou pas dans un système donné. Ce mémoire s'efforce de répondre à cette problématique en ayant comme objectif l'établissement d'un modèle de générateur diesel afin de produire de l'énergie électrique et par conséquent améliore les performances électriques d'un générateur photovoltaïque. Pour atteindre cet objectif, trois parties sont proposées.

Dans la première partie, les différentes technologies de production de l'énergie électrique par des sources renouvelables sont présentées, notamment celles de l'énergie photovoltaïque. L'intérêt de l'amélioration du rendement d'un générateur photovoltaïque est montré afin de poser la problématique du mémoire.

Les différentes configurations des systèmes de production hybrides existants et la modélisation du générateur diesel sont détaillés dans la deuxième partie. Le modèle pour chacun des éléments de cette chaîne est présenté. Un état de l'art de la modélisation de la turbine diesel et la génératrice synchrone sont donnés afin de justifier le modèle choisi et son implantation. Dans la partie 3, un bref aperçu sur la modélisation du générateur photovoltaïque, l'impact des convertisseurs statiques et les systèmes de stockages dans la mise œuvre et la flexibilité des systèmes de production hybride.

Des résultats des simulations du modèle de production hybride PV-diesel sont obtenus et interprétés dans le but de valider l'approche proposée.

# **Chapitre 1**

## Généralités sur les énergies renouvelables

## 1.1. Introduction

Il existe différentes sources d'énergie renouvelables disponibles sur la planète dont les principales sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque. Nous détaillons dans les paragraphes suivants les éléments ayant traités à cette ressource et sa transformation en énergie électrique.

## 1.2. Énergie Renouvelable

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.

Les énergies renouvelables proviennent de 2 grandes sources naturelles : le Soleil (à l'origine du cycle de l'eau, des marées, du vent et de la croissance des végétaux) et la Terre (qui dégage de la chaleur).

Surnommées « énergies propres » ou « énergies vertes », leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables [1].



**Figure 1.1** : Les différents types d'énergie renouvelable

### 1.3. Les différents types d'énergie renouvelable

#### 1.3.1. Énergie éolienne

##### 1.3.1.1. Définition

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent [2].



**Figure 1.2 :** Énergie éolienne

##### 1.3.1.2. Principe de fonctionnement

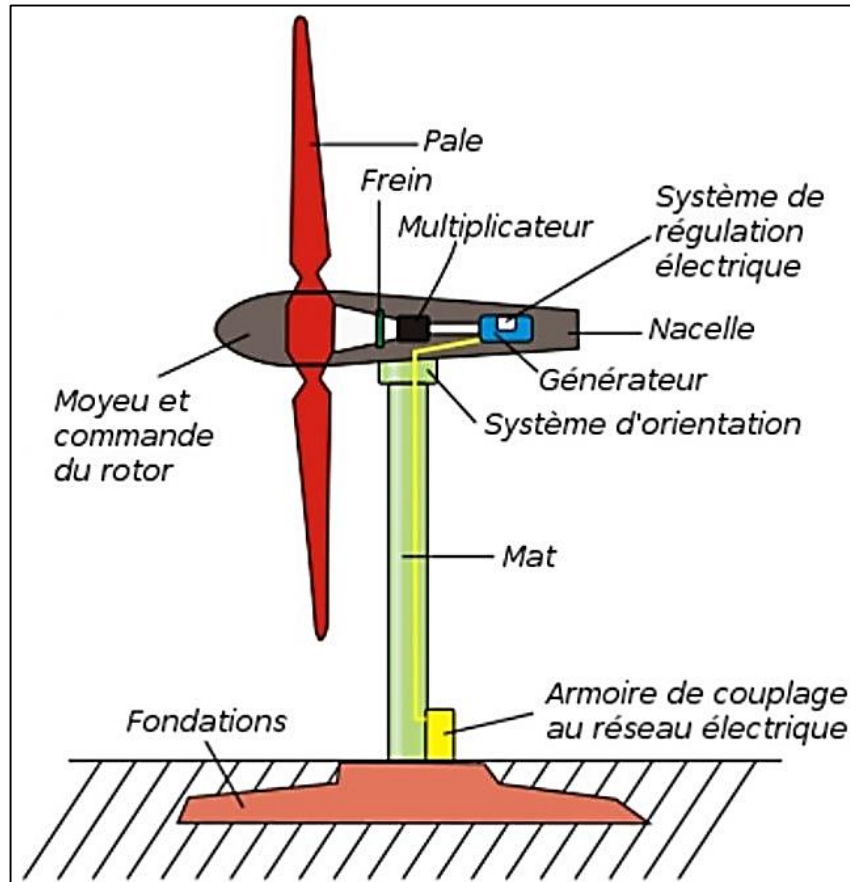
Une éolienne est un dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité. Elle est composée des principaux éléments suivants :

- 1. Un mât**, haut d'une centaine de mètres en moyenne, qui soutient la nacelle afin que celle-ci puisse capter des vents plus hauts donc plus forts ;
- 2. Une nacelle**, située en haut de ce mât, qui abrite notamment la génératrice ;
- 3. Le rotor**, auxquelles sont fixées les trois pales, entrent en mouvement rotatif grâce à l'intensité du vent et fait ainsi tourner un arbre mécanique. Le multiplicateur augmente la vitesse de celui-ci, cette énergie est enfin convertie en électricité par la génératrice ;
- 4. Une éolienne**, produit de l'électricité lorsque la vitesse du vent se situe entre 3 mètres par seconde (force suffisante pour entraîner la rotation des pales) et 25 mètres par seconde.



Lorsque ce dernier seuil de vitesse est atteint, un dispositif présent dans la nacelle se met alors en marche, celui-ci actionne le frein du rotor ainsi qu'une modification de l'inclinaison des pales, ce qui conduit à un arrêt de la machine tant que le vent ne faiblit pas.

Actionnées par le vent, les pales fixées sur le rotor entraînent une génératrice électrique installée dans la nacelle. Le courant ainsi produit, d'une tension de 400 à 690 Volts est ensuite transportée par câble souterrain jusqu'au poste de livraison. Il y est élevé à une tension supérieure (20 000 V) afin d'être injecté sur le réseau national.



**Figure 1.3 :** Principaux éléments d'une éolienne

### 1.3.1.3. Les différents types d'éoliennes

On distingue les éoliennes on shore (terme américain signifiant sur le sol c'est-à-dire sur les continents), et les éoliennes off-shore (sur la mer). Ces dernières présentent des avantages au niveau des nuisances sonores puisqu'elles sont éloignées des habitations et au niveau des vents car les vents marins sont plus nombreux et plus forts que les vents continentaux. En revanche, elles sont beaucoup plus difficiles à installer et donc beaucoup plus coûteuses [3].

## 1. Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes modernes classiques tripales : conception qui s'est imposée sur le marché mondial pour des raisons de stabilité de la structure. Il existe également des éoliennes bipales et des mono pales mais sont moins fiables.

La hauteur totale de ces éoliennes varie entre 25 et 180m pour une puissance qui va de 100 KW à 5 MW [3].



**Figure 1.4 :** Éoliennes à axe horizontal

## 2. Éoliennes domestiques

Leur taille n'excède pas les 12m et elles ont une puissance comprise entre 100W et 20Kw. Leur implantation en France est encore très faible, environ 600. (Beaucoup moins que dans certains autres pays européens). Les éoliennes horizontales ou domestiques peuvent être de type « aval » ou « amont ». Dans la majorité des cas, ce sont des éoliennes « amont », c'est-à-dire que le vent souffle directement sur les pâles de l'éolienne. Cela implique l'utilisation de pâles très rigides car elles sont très exposées au vent. La configuration « aval » est utilisée plus particulièrement pour les petites éoliennes qui sont munies de pâles plus fragiles [3].



**Figure 1.5 :** Éoliennes domestiques

### 3. Éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont plus onéreuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier. Une éolienne à axe vertical est surtout utile dans les endroits où il n'y a pas beaucoup de place : en ville, Sur le toit d'un immeuble par exemple. Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical (Savonius et Darrieus) [3].



**Figure 1.6 :** Éoliennes à axe vertical

### 1.3.2. Énergie hydraulique

#### 1.3.2.1. Définition

L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force de l'eau. Cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute), soit du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau) [4].

L'énergie hydraulique dépend du cycle de l'eau. Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable.



**Figure 1.7 :** Énergie hydraulique

#### 1.3.2.2. Principe de fonctionnement

Le premier impératif est d'avoir de l'eau, beaucoup d'eau. Le rôle du barrage consistera à la retenir. Le barrage s'oppose à l'écoulement naturel de l'eau, sauf en cas de forts débits, qu'il laisse alors passer. De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue.

Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour amorcer le cycle de production d'électricité. L'eau s'engouffre alors dans une conduite forcée ou dans une galerie creusée dans la roche suivant l'installation, et se dirige vers la centrale hydraulique située en contrebas.

A la sortie de la conduite, la pression ou la vitesse (ou les deux en même temps) entraîne la rotation de la turbine.

La rotation de la turbine entraîne celle du rotor de l'alternateur.

Un transformateur élève alors la tension du courant produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à haute et très haute tension

L'eau turbinée qui a perdu son énergie s'échappe par le canal de fuite et rejoint la rivière.

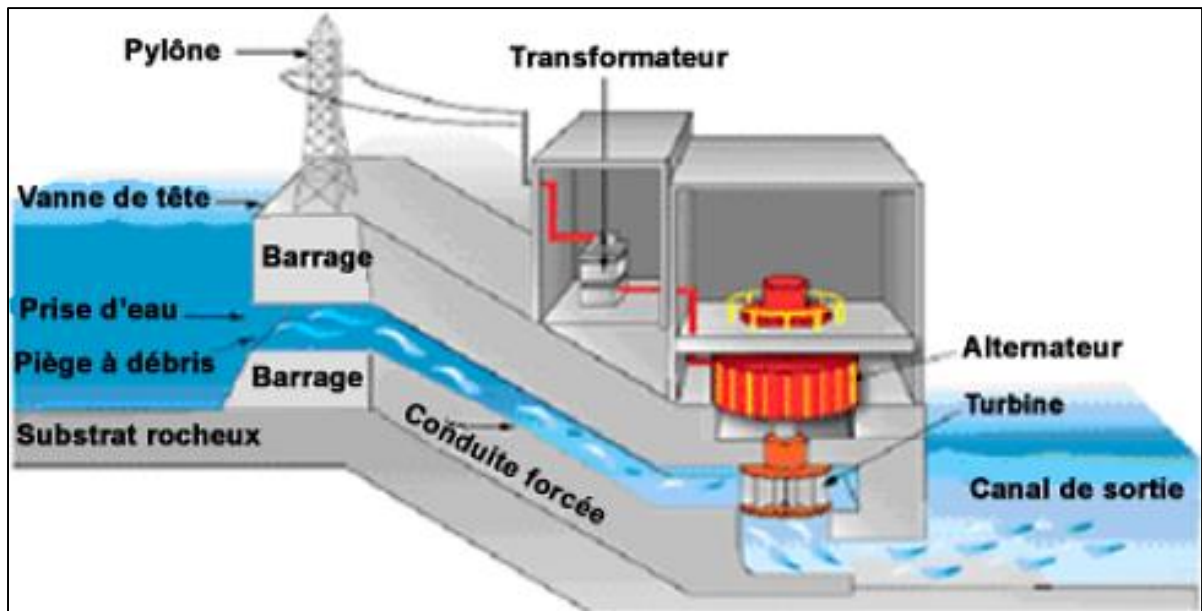


Figure 1.8 : Principe de central hydraulique

### 1.3.2.3. Les types de l'énergie hydraulique

1. **Les barrages** : permettant de retenir des grandes quantités d'eau, qui par la suite est libérée, produisant ainsi de l'électricité grâce à des turbines.
2. **L'énergie marémotrice** : qui joue sur l'énergie potentielle des marées, une énergie liée aux différences de niveaux d'eau et aux courants que celles-ci induisent.
3. **L'énergie hydrolienne** : qui exploite les courants marins grâce à une turbine hydraulique (sous-marine ou à flots).
4. **L'énergie houlomotrice** : qui compte sur l'énergie cinétique des vagues et de la houle.
5. **L'énergie thermique** : qui peut être tirée de la différence de température entre les eaux profondes et les eaux de surface.
6. **L'énergie osmotique** : qui produit de l'électricité grâce à la différence de pression que génère la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce.

### 1.3.3. Biomasse

#### 1.3.3.1. Définition

L'énergie issue de la biomasse est une source d'énergie renouvelable qui dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale. L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses [5].



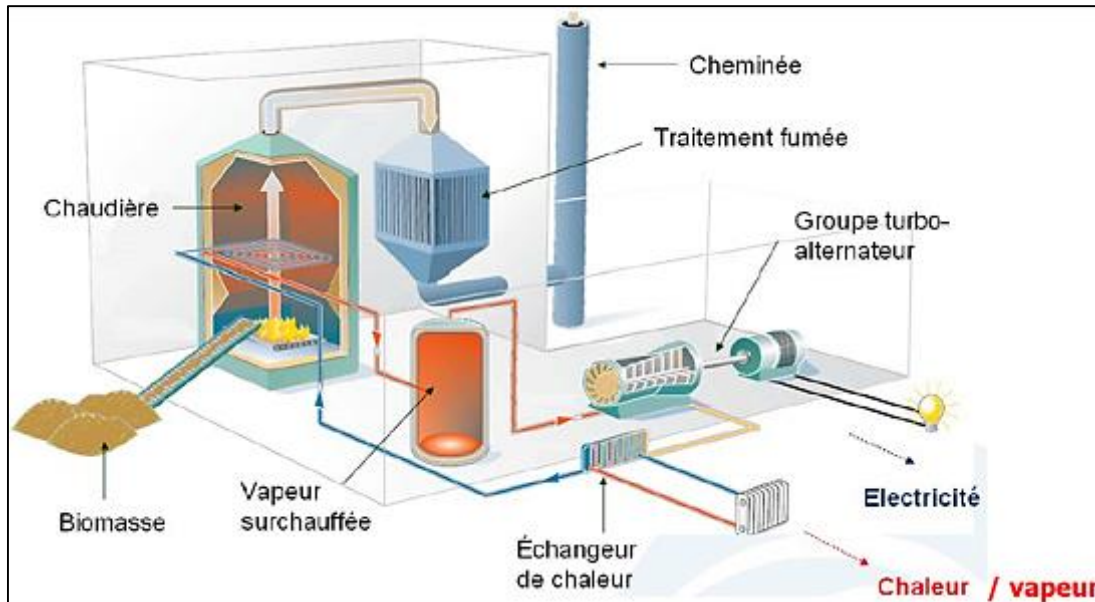
Figure 1.9 : Biomasse

#### 1.3.3.2. Principe de fonctionnement

Une centrale biomasse produit de l'électricité grâce à la vapeur d'eau dégagée par la combustion de matières végétales ou animales, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur.

- 1. La combustion :** La biomasse est brûlée dans une chambre de combustion.
- 2. La production de vapeur :** En brûlant, la biomasse dégage de la chaleur qui va chauffer de l'eau dans une chaudière. L'eau se transforme en vapeur, envoyée sous pression vers des turbines.
- 3. La production d'électricité :** La vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne et haute tension.

**4. Le recyclage :** À la sortie de la turbine, une partie de la vapeur est récupérée pour être utilisée pour le chauffage. C'est ce que l'on appelle la cogénération. Le reste de la vapeur est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. L'eau ainsi obtenue est récupérée et re-circule dans la chaudière pour recommencer un autre cycle.



**Figure 1.10 :** Principe de centrale biomasse

### 1.3.3.3. Les types de biomasse

On distingue deux types de biomasse :

- 1. Biomasse sèche :** Le bois de feu est la plus ancienne source d'énergie. Les divers déchets ligneux constituent la biomasse sèche et sont également appelés « bois énergie »
- 2. Biomasse humide :** les déchets organiques d'origine agricole (fumiers, lisiers...), agroalimentaire ou urbaine (déchets verts, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères ...) constituent la biomasse « humide », qui peut être transformée en énergie ou en engrais/amendement [5].

### 1.3.4. Énergie géothermique

#### 1.3.4.1. Définition

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans les centrales géothermiques, grâce à l'eau très chaude des nappes dans le sous-sol de la Terre. La température des roches augmente en moyenne de 1 °C tous les 30 m de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les

régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à 100 °C par 100 m [6].



**Figure 1.11** : Énergie géothermique

#### **1.3.4.2. Principe de fonctionnement**

Le principe d'une centrale géothermique est d'extraire la chaleur contenue dans le sol, soit pour l'utiliser sous forme de chauffage (réseau de chaleur), soit pour la transformer en électricité, ou les deux à la fois, c'est dans ce cas de la cogénération.

En haute et très haute énergie, la vapeur jaillit avec assez de pression pour faire tourner une turbine, afin de produire l'électricité.

En moyenne énergie, la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire : on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la terre, que l'on chauffe avec l'eau géothermale. Ce fluide se charge en énergie thermique, entre en ébullition et se vaporise, faisant tourner une turbine dont le mouvement, transmis à l'alternateur, produit de l'électricité.

Une centrale géothermique est donc une centrale thermique.



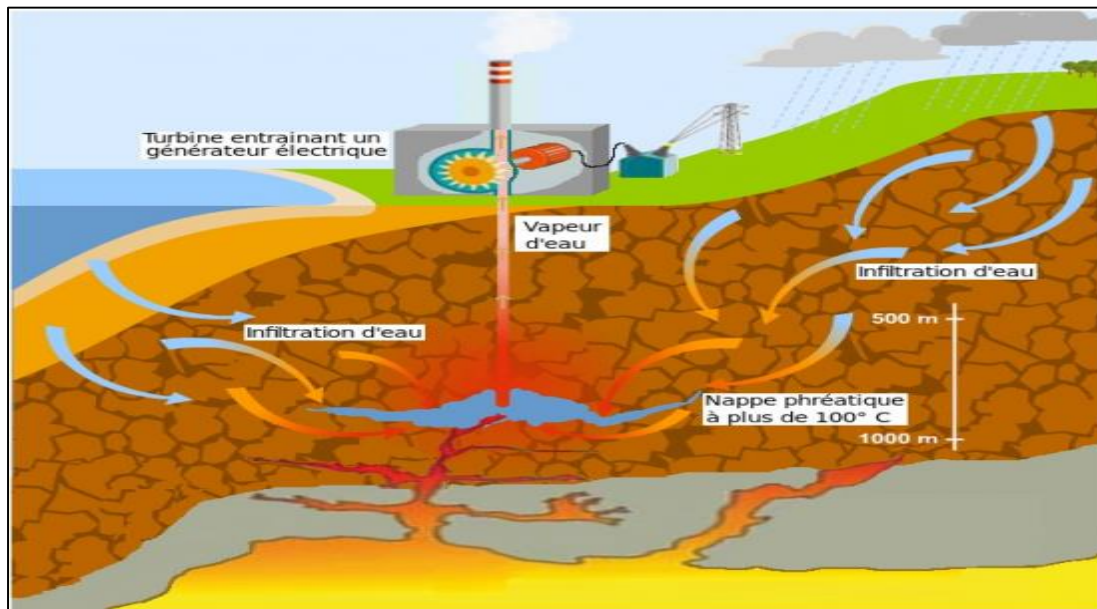


Figure 1.12 : Centrale géothermique

#### 1.3.4.3. Différents types de gisements géothermiques

Les gisements peuvent être classés selon plusieurs critères : Le contexte géologique, le niveau de température, le mode d'exploitation, le type d'utilisation. On retrouve la classification en fonction de la température :

- Géothermie haute énergie ( $T > 150^{\circ}\text{C}$ ) : À cette température, on peut transformer directement la vapeur en électricité.
- Géothermie moyenne énergie ( $90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ ) : Elle permet de produire de l'électricité avec un fluide intermédiaire.
- Géothermie basse énergie ( $30^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$ ) : Elle est utilisée pour fournir de la chaleur de manière directe aux bâtiments, serres...
- Géothermie très basse énergie ( $T < 30^{\circ}\text{C}$ ) : Elle est utilisée pour rafraîchir les bâtiments soit par puits Canadiens (ou puits provençal) ou par PAC géothermique [6].

#### 1.3.5. Energie solaire

##### 1.3.5.1. Définition

L'énergie solaire est une énergie qui dépend du soleil, bien que cette dernière distante de plus de (150) millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente.

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires qui permet de récupérer l'énergie du soleil et de produire de l'électricité, sans pièces tournantes et sans

bruit et elle n'émet aucun gaz à effet de serre. L'électricité produite peut être soit stockée dans des batteries pour les installations autonomes, soit injecté dans le réseau.

Par sa souplesse et sa facilité d'installation et de maintenance, l'énergie solaire est une solution technique et économique pour l'électrification des sites isolés

### 1.3.5.2. Les types de l'énergie solaire

#### 1. Énergie solaire thermique

Dans les conditions terrestres, le rayonnement thermique se situe entre 0,1 et 100 micromètres. Il se caractérise par l'émission d'un rayonnement au détriment de l'énergie calorifique du corps émetteur. Ainsi, un corps émettant un rayonnement thermique diminue son énergie calorifique alors qu'un corps recevant un rayonnement thermique augmente son énergie calorifique. Le soleil émet principalement dans le rayonnement visible, entre 0,4 et 0,8 micromètre. Ainsi, en entrant en contact avec un corps, le rayonnement solaire augmente la température de ce corps. On parle d'énergie solaire thermique. Cette source d'énergie est connue depuis très longtemps et est utilisée par exemple, pour chauffer ou sécher des objets en les exposant au soleil [7].



**Figure 1.13 :** Énergie solaire thermique

## 2. Énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers [8].



**Figure 1.14 :** Énergie photovoltaïque

### 1.3.5.3. Fonctionnement d'une installation photovoltaïque

Trois éléments sont nécessaires à une installation photovoltaïque : des panneaux solaires, un onduleur et un compteur.

Ces trois éléments permettent de récupérer l'énergie transmise par le soleil, de la transformer en électricité puis de la distribuer à l'ensemble des clients connectés au réseau.

- Les panneaux solaires convertissent directement la lumière en courant électrique continu.
- L'onduleur permet ensuite de transformer l'électricité obtenue en courant alternatif compatible avec le réseau.
- Le compteur mesure la quantité de courant injectée dans le réseau [8].

#### 1.4. Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque) qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (*GPV*) qui a une caractéristique courant-tension ( $I - V$ ) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

La caractéristique  $I - V$  du *GPV* dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, son point de fonctionnement du *GPV* dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du *GPV*, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible [8].

L'énergie solaire photovoltaïque (*PV*) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules générateur photovoltaïque (*GPV*) qui a une caractéristique statique courant-tension ( $I - V$ ) non linéaire et présentant un point de puissance maximale (*PPM*). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Le point de fonctionnement du (*GPV*) peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit  $I_{CC}$  et la tension en circuit ouvert  $V_{OC}$ . La détermination du point de fonctionnement du *GPV* dépend directement de la charge à laquelle il est connecté. Il est plus ou moins éloigné du *PPM*, caractérisé par le courant et la tension optimaux notés ( $I_{OPT}$ ,  $V_{OPT}$ ) [8].

#### 1.5. Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 *km*, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son

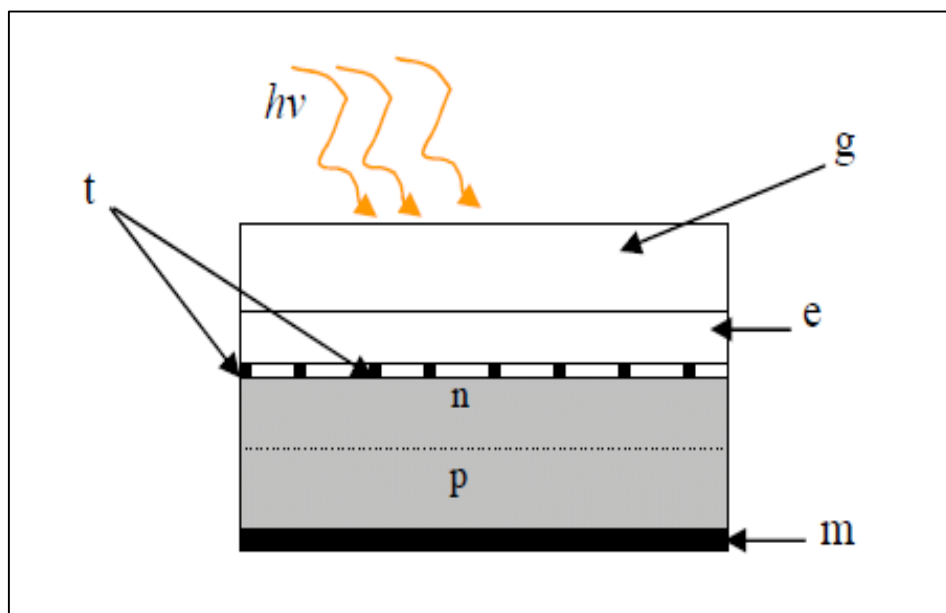
noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [9].

## 1.6. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque

### 1.6.1. La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homojonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne. [9]



**Figure 1.15** : présentation schématique d'une cellule solaire

Dans la figure (1.15) un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire, Elle se compose d'un abri du verre (*g*), un encapsulant (*e*), et un métal en arrière contact (*m*) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident. La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ( $h\nu$ ) est supérieure à celle de l'énergie du matériau, appelée l'énergie de bande gap ( $E_g$ ), le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type-p et celui de trous du semi-conducteur de type-n

augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à  $E_g$ , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [9].

### 1.6.2. Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (1.16). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [9].

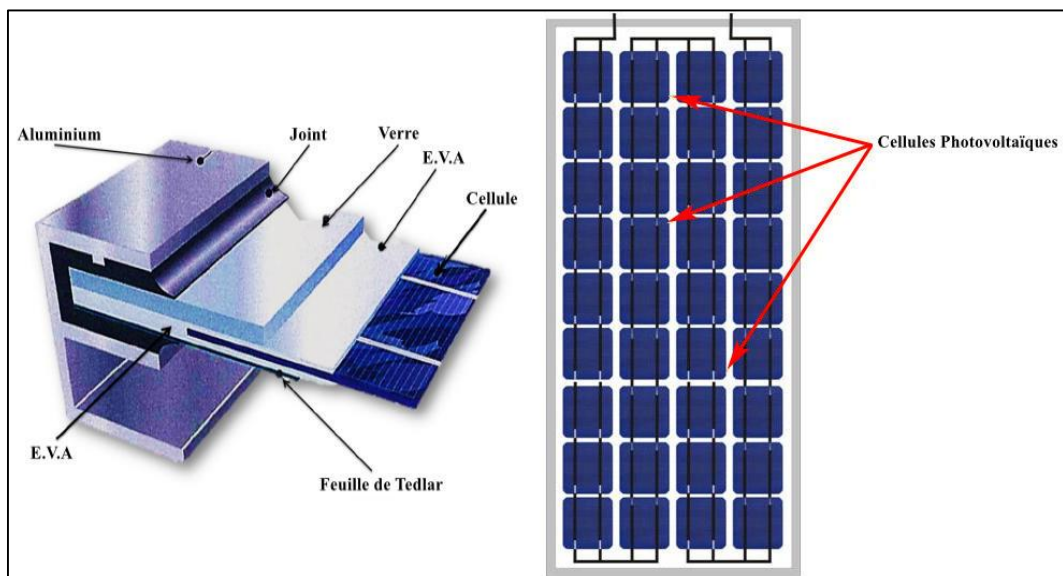


Figure 1.16 : Module photovoltaïque

### 1.6.3. Le panneau solaire

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [10].



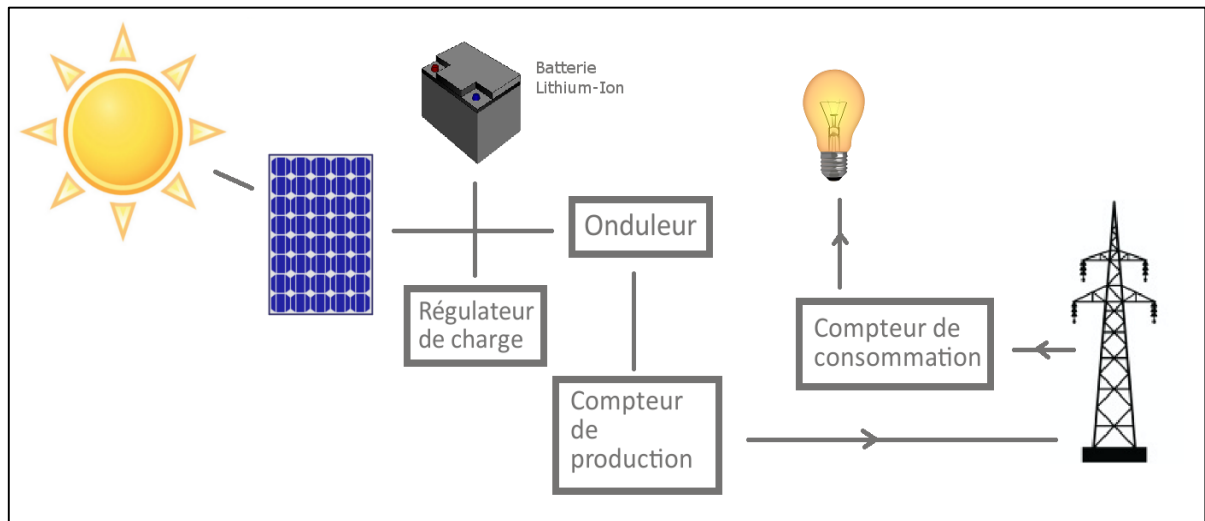
**Figure 1.17 :** Panneau solaire

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations :

- **Non autonomes ou « grid connected »** i.e. rattachées au réseau de distribution électrique. Dans Les systèmes reliés aux réseaux, les consommateurs standards de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur). Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque injecté au réseau public et les demandes de puissance qui existent la capacité de production du générateur sont attachées sur le réseau.

- **Autonomes ou « stand-alone »** qui sont le propose de cette étude, ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est-elle assurée par un système de stockage d'énergie [10]. En général ces installations comprennent quatre éléments :

- Un ou plusieurs modules PV.
- Le système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries.
- L'onduleur.



**Figure 1.18 :** Schéma simplifié d'un système PV

### 1.7. Les avantages de l'énergie de système photovoltaïque

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Une haute fiabilité, elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

### 1.8. Les inconvénients de l'énergie de système photovoltaïque

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Le non disponibilité de la source d'une façon permanente.
- L'occupation d'espace pour les installations de grandes dimensions.



### 1.8. Conclusion

La définition des principes de fonctionnement des sources d'énergie sont nécessaires pour évaluer le comportement d'un système de production hybride. C'est pourquoi dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux éléments d'un système photovoltaïque et leurs utilisations (application) pour création d'un système hybride PV/Diésel. Ainsi les différentes structures de combinaisons de système photovoltaïque avec les générateurs diesel et systèmes de stockages.

Pour hybridation d'une installation diesel existante en énergie photovoltaïques, nous pouvons adopter la structure de configuration AC grâce à leurs aspects pratiques et leurs compatibilités avec le réseau électrique, pour créer un système hybride permettent de fournir de l'énergie électrique sans interruption et assurer une bonne qualité d'énergie, d'où le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence de bus (AC). Dans un système hybride PV/Diésel qui alimente un réseau électrique isolé, le générateur diesel est considéré comme une source secondaire qui peut contribuer à la fixation des grandeurs de réseau électrique tension et fréquence, le générateur photovoltaïque a l'avantage de produire de l'énergie électrique à partir de ressources naturelles gratuites (soleil). Tandis que les batteries électrochimiques et les supercondensateurs peuvent être utilisés comme sources auxiliaires dédiées au stockage de l'énergie afin d'améliorer le comportement des systèmes hybrides PV/Diésel en régime transitoire.

# **Chapitre 2**

Différentes configurations des  
systèmes hybrides et modélisation  
du générateur diesel

### 2.1. Introduction

Parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables, il ya les systèmes d'énergie hybrides. Le terme système d'énergie hybride fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources.

La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, l'énergie photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesel utilisés généralement pour produire l'électricité dans les régions isolées.

Les systèmes d'énergie hybride sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage jusqu'à l'électrification complète de villages ou de petites îles. Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi.

Nous allons présenter dans ce chapitre les différentes configurations des systèmes hybride photovoltaïque-diesel, en se basant sur les différentes définitions des constitutifs de ce système. La modélisation aura ainsi pour but d'établir les modèles mathématiques à la fois précis qui régissent les fonctionnements physiques de telles installations étudiées et en suite retrouver par simulation l'influence des paramètres sur les caractéristiques des générateurs (générateur photovoltaïque et générateur diesel) pour un transfert optimum de l'énergie vers les récepteurs.

### 2.2. Systèmes hybrides

#### 2.2.1. Définition :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [12].

La combinaison de plusieurs sources d'énergie renouvelable permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien de point de vue technique qu'économique.

### 2.3. Importance de l'hybridation

La combinaison de plusieurs sources d'énergies surtout les renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs

hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif. De plus, l'hybridation permet de :

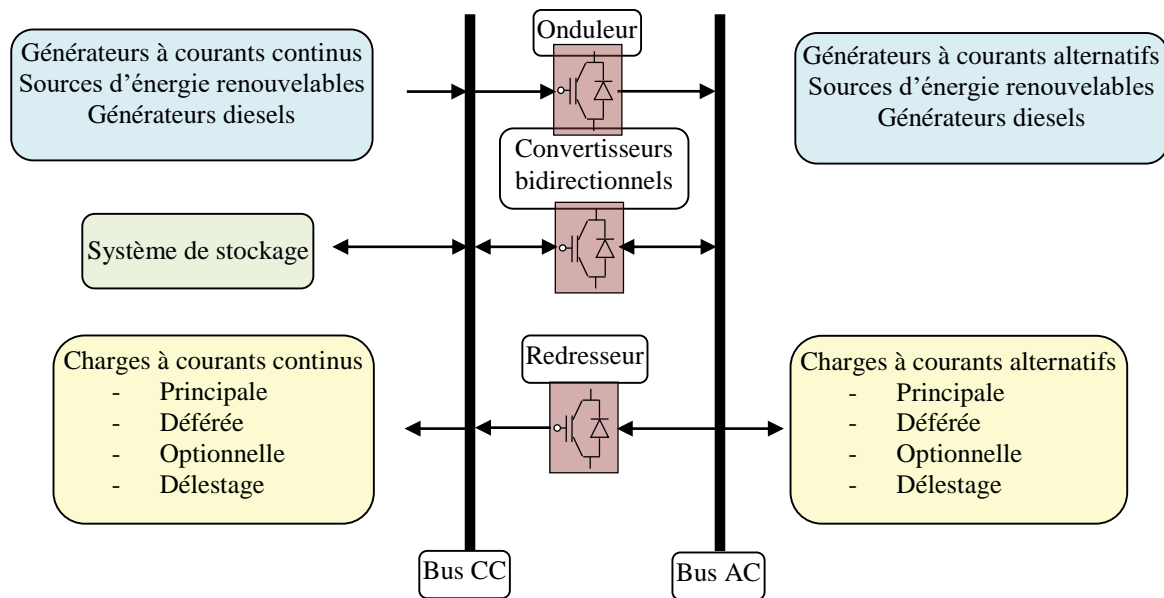
Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie. Par exemple, l'absorption des pics aléatoires de puissances positives ou négatives générés par la charge (phases d'accélération ou de freinage de véhicules électriques...). Autrement dit, il s'agit ici d'être capable, d'une manière générale, de délivrer ponctuellement des puissances supérieures à la puissance moyenne du générateur électrique ou de récupérer de l'énergie pour recharger la source de puissance.

Palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie. Par exemple, pendant le démarrage d'une pile à combustible, ou lorsque le soleil est masqué par des nuages devant le générateur photovoltaïque ou en l'absence de vent.

Cependant, ces solutions exigent un dimensionnement laborieux préalable basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir-faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer. Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle rendu possible grâce à des logiciels très puissants.

### **2.4. État de l'art sur les systèmes hybrides**

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesels (GD) et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SHE peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Celles-ci sont résumées dans la Figure 2.1. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [13] : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution.



**Figure 2.1 :** Architecture des systèmes hybrides d'énergie (SHE) [14]

Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la dimension et la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. À part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (Charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique [12]. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un SHE avec des batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelable et des diesels), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite, il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source.

## 2.5. Classification

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues.

### 2.5.1. Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome.

Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc [14].

### 2.5.2. La structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière. Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc. ... La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc [14].

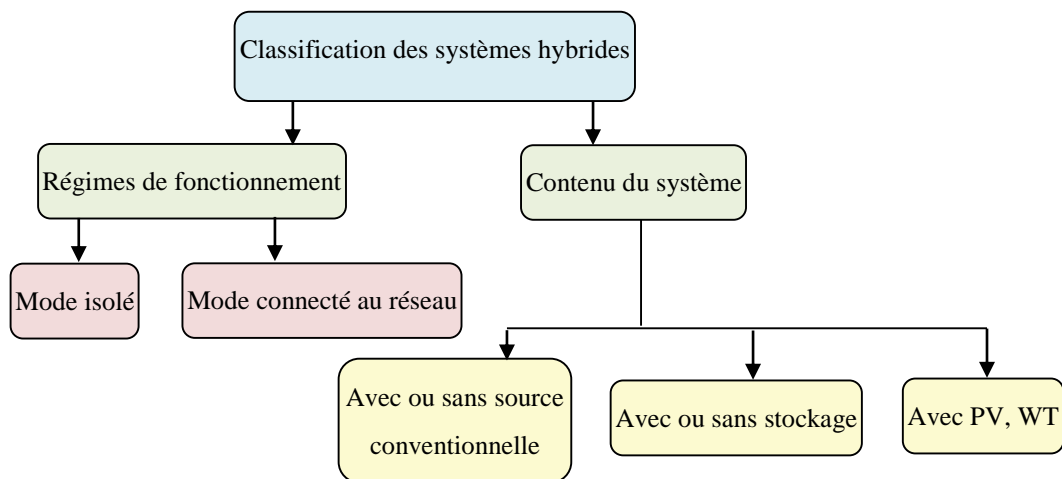


Figure 2.2 : Classification des systèmes hybrides

## **2.6. Avantages et inconvénients d'un système hybride**

### **A). Avantage**

- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et révision réduits.

### **B). Inconvénient**

- Coût de capital élevé comparé aux générateurs diesel.
- Plus complexe que les systèmes électriques isolés ; nécessite le stockage de batterie et le conditionnement de l'électricité

## **2.7. Problématique de la gestion d'énergie électrique**

La production décentralisée d'énergie électrique, bénéficie actuellement d'un essor très important. Plusieurs sources d'énergie renouvelables et gratuites, telles que le vent (éoliennes), le soleil (thermiques ou photovoltaïques), sont de plus en plus utilisées pour produire l'énergie électrique localement sur des sites isolés. A cause de l'inconstance du vent et de la lumière, la gestion de l'énergie constitue l'un des défis majeurs dans les systèmes électriques éoliens, ainsi que dans les systèmes photovoltaïque déconnectés du réseau. Dans ce travail nous nous intéresserons à l'étude de la gestion d'énergie d'un système hybride photovoltaïque-éolien avec stockage (batterie).

## **2.8. Architectures Électriques Des Systèmes Hybrides**

La conception d'un système hybride repose essentiellement sur le type de bus (réseau d'interconnexion des différents composants du système), divisés généralement en trois catégories:

- Les systèmes avec Bus DC.
- Les systèmes avec Bus AC.
- Les systèmes Mixtes avec Bus DC et AC.

### **2.8.1. Système avec Bus DC**

Dans un système avec Bus DC, les composants sont interconnectés en un point commun sous une tension continue (champ PV, ensemble groupe électrogène, chargeur de batterie, utilisation DC). Cette configuration est adaptée pour les utilisations fonctionnant en courant continu. S'il y a nécessité de disposer des deux fonctions (chargeur et onduleur), deux solutions

peuvent être envisagées pour assurer la recharge de la batterie avec le groupe électrogène : l'emploi d'un onduleur et d'un chargeur séparés ou celui d'un convertisseur multifonctionnel.

### Avantage

- Possibilité de recharger la batterie avec des modules PV connectés sur le BUS DC via un régulateur. L'emploi de régulateurs MPPT rend possible l'utilisation de modules PV de forte puissance développés pour les systèmes raccordés au réseau.
- Garantie d'alimentation électrique des utilisations AC dans la plage de tension et de fréquence.
- Généralement, absence d'impact sur les utilisations lors de la commutation onduleur/groupe électrogène (coupures très brèves d'alimentation).
- Démarrage automatique du groupe électrogène en fonction de la demande de puissance et de l'état de charge de la batterie.
- Gestion optimale du groupe électrogène (celui-ci travail toujours à sa puissance nominale, quelle que soit la puissance consommée par les utilisations).
- Absence de surcharge du groupe électrogène si le convertisseur assure une assistance à la source [14].

### Inconvénient

- Puissance de chargeur dépendant de la puissance de l'onduleur.
- Nécessité d'un groupe électrogène de bonne qualité pour permettre la synchronisation avec l'onduleur.

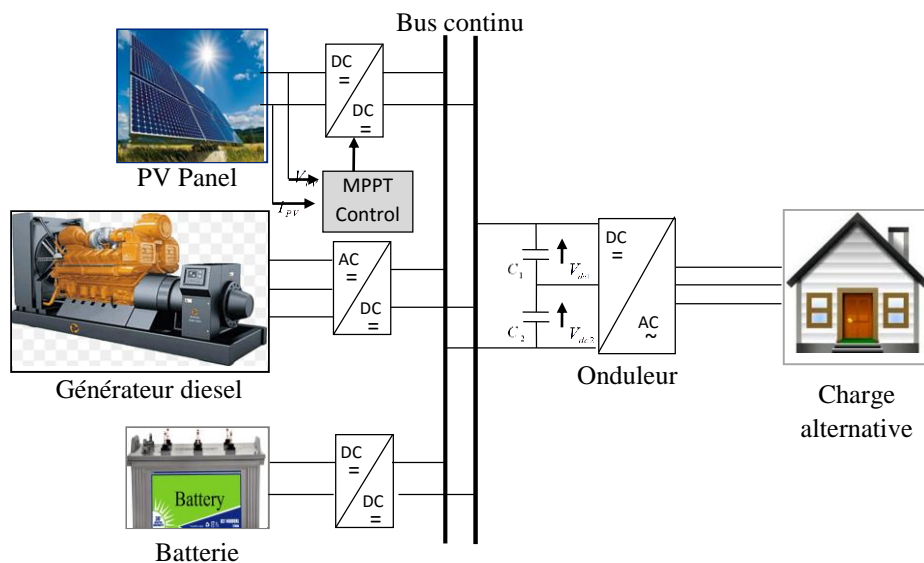


Figure 2.3 : Schéma système avec bus DC



### 2.8.2. Système avec Bus AC

Dans un système hybride avec bus AC, les composants sont interconnectés en un point commun sous une tension alternative. Cette configuration est particulièrement adaptée pour les applications fonctionnant en courant alternatif et en journée [16].

#### Avantage

- Possibilité d'utiliser des modules PV développés pour la connexion au réseau avec des onduleurs PV.
- Faibles section de câbles entre le champ PV et l'onduleur PV.
- Bon rendement énergétique pour une utilisation directe de l'énergie PV en journée. Utilisation de dispositif de protection AC standard.
- Système évolutif. Possibilité de coupler d'autres générateurs sur le mini réseau [14].

#### Inconvénients

- La puissance maximale de l'onduleur PV est limitée par la puissance du convertisseur multifonctionnel.
- Moins bon rendement énergétique si l'énergie PV doit être stockée dans la batterie pour être restituée durant la nuit.
- Multitude d'implantations de générateurs PV.
- Le prix Euro/kW d'un onduleur est plus élevé que celui d'un contrôleur de charge MPPT.
- Fiabilité du système tributaire du bon fonctionnement du convertisseur (impossibilité de recharger la batterie par le champ PV en cas de défaillance du convertisseur).
- Le couplage de l'onduleur PV sur le réseau alimenté par le groupe électrogène peut être problématique si la régulation en tension et fréquence n'est pas de bonne qualité.
- La régulation de tension de fin de charge de la batterie par la fréquence peut être moins fine qu'avec une régulation PWM.
- Des variations brusque de puissance au niveau des utilisations peuvent entrainer des courants inverses non contrôlés au niveau du groupe électrogène et susceptibles d'être destructeur [14].

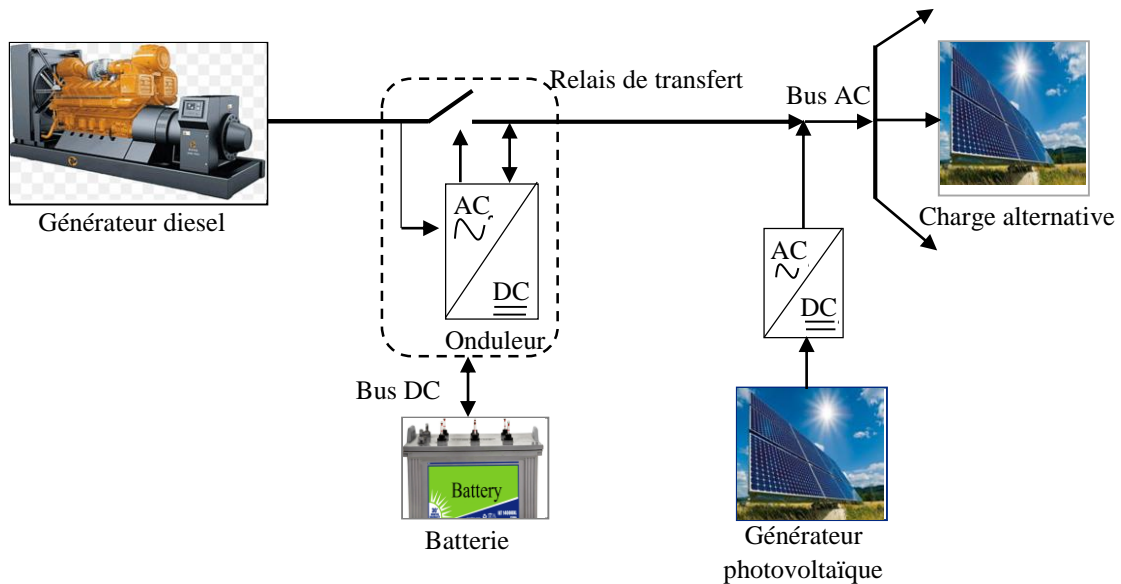


Figure 2.4 : Schéma système avec bus AC

### 2.8.3. Systèmes Mixtes avec Bus DC et AC

Selon les cas de figure, il est possible de concevoir des systèmes hybrides qui fonctionnent en double configuration sur Bus DC et AC. Les deux principes de fonctionnement décrits précédemment sont applicables. Cette configuration peut être préférée pour plusieurs raisons :

- Optimisation énergétique en fonction de la courbe de charge des utilisations.
- Fiabilité de fonctionnement en cas de décharge profonde de la batterie.
- Augmentation de puissance sans remise en cause de l'existant

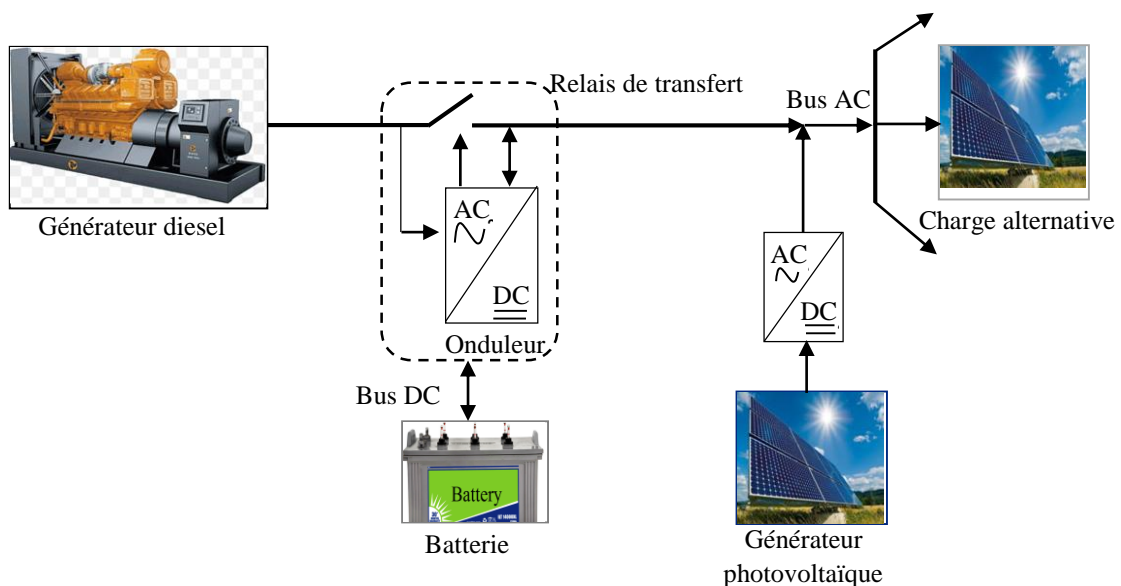


Figure 2.5 : Schéma systèmes mixtes avec bus DC et AC

## 2.9. Structure du système hybride

Pour structurer un système hybride, trois critères peuvent être pris en compte :

- La présence ou non de sources d'énergie classique, comme un groupe électrogène, une micro turbine à gaz, etc.
- La présence ou non de dispositifs de stockage. La présence d'un stockage permet de satisfaire la demande des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une source primaire à convertir en électricité (soleil, vent). Ces dispositifs peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoir d'hydrogène, etc.
- La structure du système peut contenir des modules photovoltaïques, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection des sources utilisées est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le profil de consommation de la charge électrique alimentée. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle.

## 2.10. Les différents types des configurations

### 2.10.1. Configuration PV/Diesel série

Dans ce type de configuration, le générateur diesel est connecté au bus à courant continu. La connexion peut se faire directement (dans le cas d'un générateur à courant continu) ou à travers un redresseur. Le générateur peut alimenter la charge à travers des convertisseurs électroniques ou charger la batterie. Lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge, le groupe diesel est débrayé. La puissance en courant continu fournie par le champ PV et la batterie est convertie en courant alternatif par un onduleur. Il faut noter que dans la plupart de ce type de configurations, le transit d'une grande partie de l'énergie par la batterie diminue le rendement du système [17].

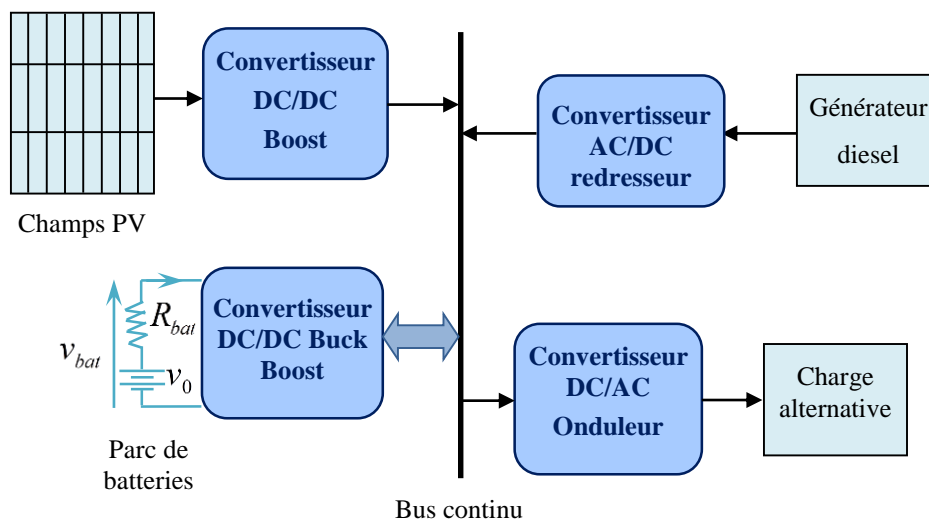


Figure 2.6 : Schéma synoptique du système d'énergie PV/Diesel série

### Avantage

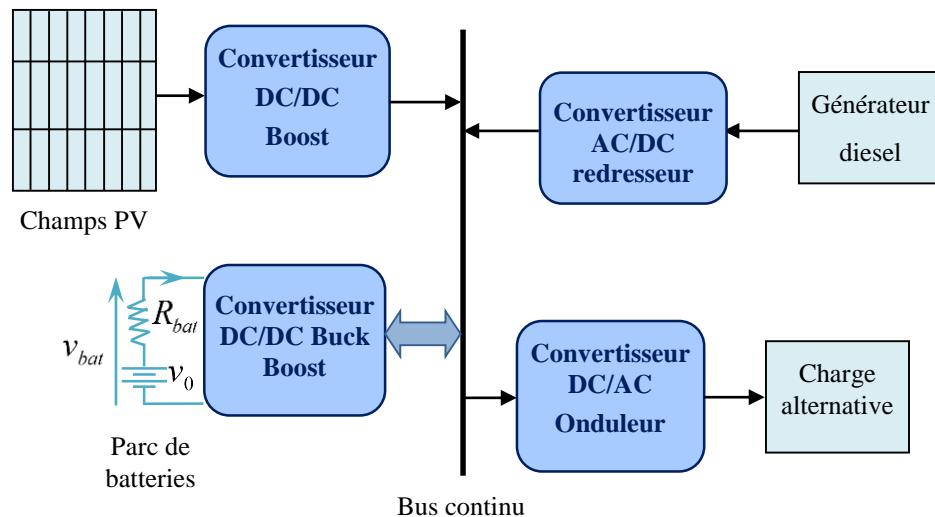
- Un schéma électrique simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif ;
- La mise en marche du générateur diesel n'est pas liée avec une interruption de l'alimentation électrique ;
- Grâce à l'onduleur, le consommateur peut être alimenté avec une tension dont la forme, l'amplitude et la fréquence sont convenables.
- Un dimensionnement facile du générateur.

### Inconvénients

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière à ce qu'il puisse couvrir la charge maximale possible ;
- La batterie doit avoir une grande capacité ;
- Un rendement relativement faible dans le cas d'un générateur diesel à courant alternatif, parce que la puissance fournie est convertie deux fois avant d'arriver au consommateur ;
- Une avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique.

#### 2.10.2. Configuration PV/Diesel commuté

Dans ce type de configuration, le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur, mais le fonctionnement en parallèle est toujours impossible [17]. La batterie peut être chargée par le champ PV et le diesel par l'intermédiaire d'un redresseur. Il n'y a pas des pertes de conversion significatives liées à la production du générateur diesel (en comparaison par rapport à la configuration série). En principe, la puissance produite par le générateur diesel est supérieure à la demande de la charge et l'excès est utilisé pour charger la batterie. Le diesel est arrêté lorsque la demande est faible et qu'elle peut être satisfaite par le champ photovoltaïque et la batterie. La complexité du système implique l'utilisation d'un contrôle automatique à la place de la commande manuelle.



**Figure 2.7 :** Schéma synoptique du système d'énergie PV/Diesel commuté

### Avantages

- Le générateur peut fournir l'énergie produite directement à la charge, ce qui augmente le rendement du système et diminue la consommation du carburant ;
- Une avarie de l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le générateur diesel ;
- L'onduleur peut fournir au consommateur la tension désirée en forme et en valeur [16].

### Inconvénients

- L'apparition d'une coupure instantanée lors de la commutation des sources ;
- Le générateur diesel et l'onduleur doivent être dimensionnés pour la consommation maximale du système ;
- Une construction complexe [17].

### 2.10.3. Configuration PV/Diesel parallèle

Dans cette configuration, toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande mais également suppléer les pointes en combinant les sources. Le générateur diesel est connecté au bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe au chargement de la batterie, soit comme onduleur quand la charge est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. La charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. On diminue le nombre des éléments dans le système en utilisant un seul convertisseur. De plus, les coûts du câblage et l'installation du système

peuvent être diminués par l'intégration de toutes les composantes dans une seule unité, ce qui est avantageux, mais peut empêcher l'augmentation de la taille du système par l'ajout de nouveaux composants si la demande en électricité augmente.

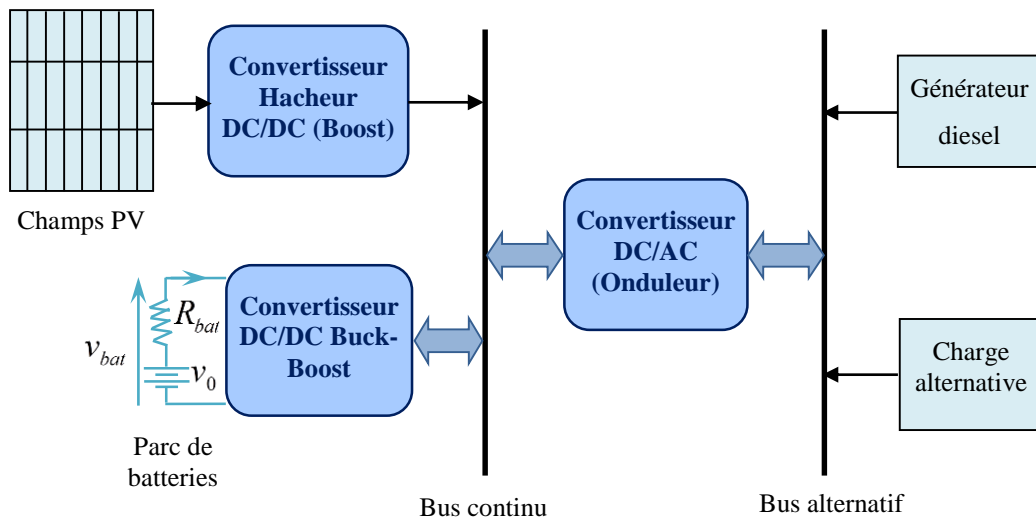


Figure 2.8 : Schéma synoptique du système d'énergie PV/Diesel parallèle

### Avantages

- Les composants des systèmes n'ont pas besoin d'être dimensionnés pour la charge totale car le consommateur peut être alimenté par les deux sources en même temps ;
- Un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus, il n'y a pas de conversion de l'énergie produite par le générateur ; Baisse du nombre des convertisseurs électroniques, ce diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride ;
- Une avarie du convertisseur initial électronique ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.

### Inconvénients

- Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système ;
- Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible ;
- Nécessité d'une personne qualifiée
- Le bus continu est plus difficile à contrôler

#### 2.10.4. La configuration Flexy Energy

Le concept Flexy Energy est une approche originale pour assurer la fiabilité, la qualité et la rentabilité de la fourniture d'électricité en milieu rurale et péri-urbain, tout en garantissant un coût stable, compatible avec les capacités des bénéficiaires. Le concept Flexy-Energy porte sur la configuration originale de centrale hybride solaire PV/groupe électrogène, sans stockage dans les batteries, et fonctionnant à la fois au diesel et/ou aux huiles végétales. Le concept Flexy Energy se

propose également de mettre en place une gestion intelligente de la production d'électricité à partir des diverses sources (PV, diesel.) et des charges des consommateurs

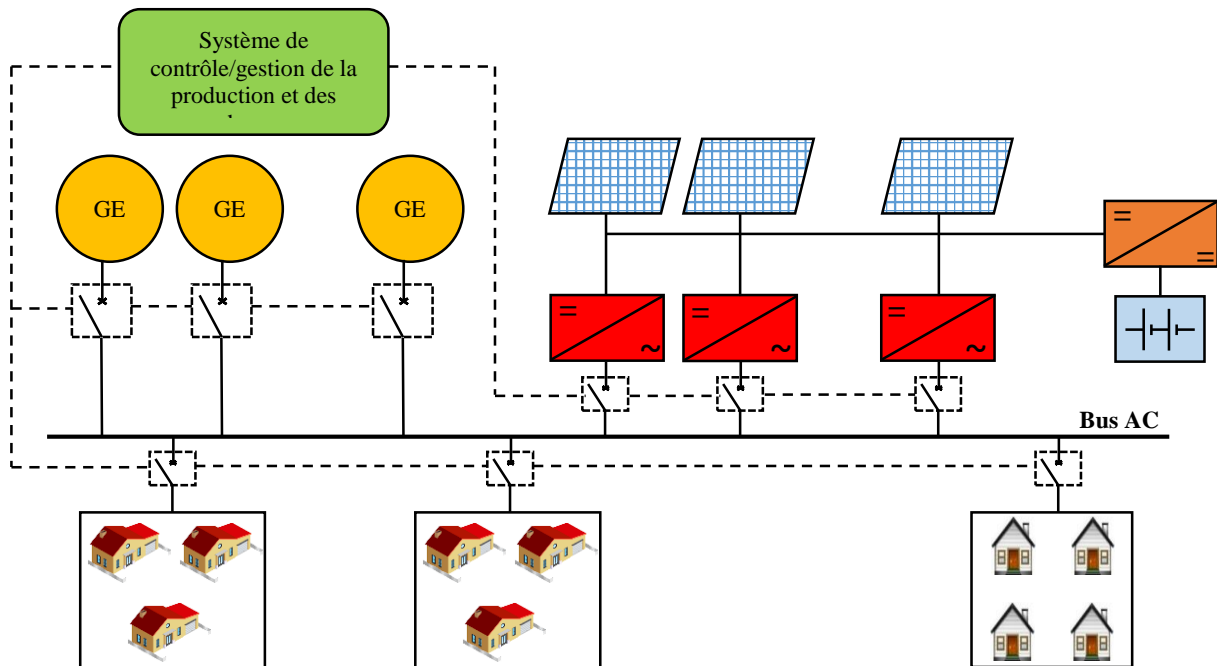


Figure 2.9 : Architecture générale des centrales Flexy Energy

La configuration Flexy Energy est une nouvelle architecture des systèmes hybrides PV/Diesel parallèle dans laquelle il y'a une gestion optimisée de la production et des charges à travers une unité de contrôle-commande appelée le Flexy Control.

### 2.11. Modélisation du générateur Diesel

Un générateur diesel résulte de l'association d'un moteur thermique diesel et d'un alternateur électrique, le plus souvent de type synchrone. Lorsque ce moyen de production d'énergie est utilisé dans les systèmes hybrides solaires PV, il assure généralement la fonction maîtresse du système et l'onduleur PV se synchronise sur lui

La modélisation d'un générateur diesel est consistée sur deux caractéristiques prépondérantes, la première est consommation (horaire ou spécifique) de carburant et les paramètres électriques de générateur diesel (puissance, courant, fréquence et tension).

Rendement énergétique d'un générateur diesel est défini :

$$\eta = \frac{P_{GD}(i)}{H(i)} \quad (2.1)$$

avec :

$P_{GD}(i)$  : puissance produit par le GD à l'instant  $i$  [KW].

$H(i)$  : consommation horaire de chaleur [kcal/h].

$$H = \frac{P_{GD}(i)}{q_{GD}(i)} \quad (2.2)$$

$q_{GD}(i)$  : La consommation en carburant de GD à l'instant  $i$  [l/h].

Pour modélisation la consommation en carburant en fonction de la puissance électrique demandée.

Il y a plusieurs modèles, parmi lesquels :

### A. Modèle linéaire

La consommation en carburant (en litres/h) est supposée croître linéairement avec la puissance utile demandée par la charge. Cependant, il apparaît que la consommation de carburant, en approchant la puissance nominale du générateur Diésel, augmente plus rapidement que l'approximation linéaire (dégradation du rendement).

Le générateur diesel est généralement caractérisé par sa consommation (horaire en l/h ou spécifique en l/kWh), la consommation horaire d'un générateur diesel peut être exprimée comme suit :

$$q_{GD}(t) = \alpha \cdot P_{GD}(t) + \beta \cdot P_{GD.nom} \quad (2.3)$$

D'où :

$\alpha, \beta$  : constants [l/kWh] sont des constantes caractéristiques du générateur diesel,

$P_{GD}(t)$  : (KW) est la puissance générée par le générateur diesel à un instant  $t$  donné,

$P_{GD.nom}$  : est la puissance nominale du générateur diesel. Elles sont définies :

$$P_{GD}(t) = \sqrt{3} \cdot I_{GD}(t) \cdot U_{GD.nom.AC} \cdot \cos(\varphi) \quad (2.4)$$

$$P_{GD}(t) = \sqrt{3} \cdot I_{GD}(t) \cdot U_{GD.nom.AC} \cdot \cos(\varphi) \quad (2.5)$$

D'où:

$U_{GD.nom.AC} \cdot \cos(\varphi)$  : sont respectivement la tension nominale et le facteur de puissance du générateur Diésel



$I_{GD}(t)$  : est le courant fourni par un générateur diesel à un instant est donné par. Il définit :

$$I_{GD}(t) = I_{GD \max} \cdot x_{GD}(t) \quad (2.6)$$

$I_{GD \max}$  : intensité maximale du générateur diesel,

$x_{GD}(t)$  : Taux de charge (exprimée en pourcentage de sa puissance nominale) à un instant t.

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

$$I_{GD}(t) = \sum_{i=1}^{n_{GD}} I_{GD \max} \cdot x_{GD}(t) \cdot \varepsilon_i(t) \quad (2.7)$$

$\varepsilon_i(t)$  : traduit l'état d'arrêt ou de marche de générateur i à un instant t ( $\varepsilon_i(t) = 1$  si générateur est en marche et  $\varepsilon_i(t) = 0$  si générateur est en arrêt). Alors, la consommation en carburant et les puissances du générateur diesel deviennent :

$$q_{GD}(t) = \sqrt{3} \cdot \cos(\varphi_i) \cdot \sum_{i=1}^{n_{GD}} [I_{GD i \max, nom, AC} \cdot (\alpha + x_{GD}(t) + \beta) \cdot \varepsilon_i(t)] \quad (2.8)$$

$$P_{GD}(t) = \sum_{i=1}^{n_{GD}} \sqrt{3} \cdot I_{GD i}(t) \cdot U_{GD i, nom, AC} \cdot \cos(\varphi) \cdot \varepsilon_i(t) \quad (2.9)$$

$$P_{GD, nom} = \sum_{i=1}^{n_{GD}} \sqrt{3} \cdot I_{GD i \max} \cdot U_{GD i, nom, AC} \cdot \cos(\varphi_i) \cdot \varepsilon_i(t) \quad (2.10)$$

## B. Modèle polynomial

Un modèle polynomial d'ordre 2 apparait comme un modèle plus précis pour décrire le comportement du groupe électrogène sur l'ensemble de sa plage de puissance. La consommation du générateur diesel s'exprime donc de la manière suivante :

$$q_{GD} = \alpha_{GD} + \beta_{GD} \cdot P_{GD} + \gamma_{GD} \cdot P_{GD}^2 \quad (2.11)$$

De façon à modéliser la consommation du générateur diesel en fonction de la puissance électrique qui lui est demandée, nous nous sommes basés sur les données constructrices fournies par la société CATERPILLAR [CAT] concernant 7 générateur diesel 50Hz, de puissance nominale allant de 9,5 à 40 kVA, dans la gamme GEP. Les données de consommation fournies sont exprimées en fonction du pourcentage de la puissance nominale du générateur diesel (50%, 75%, 100% et 110%). De façon à obtenir un modèle générique intégrant la puissance nominale,

l'évolution des paramètres en fonction de la puissance apparente du générateur diesel a été étudiée.

Des modèles d'évolution linéaires ( $\alpha_{GE}$  et  $\beta_{GE}$ ) et exponentiel ( $\gamma_{GE}$ ) ont été retenus :

$$\begin{cases} \alpha_{GE} = \alpha_{GE} \cdot S_{GE} + b_{GE} \\ \beta_{GE} = c_{GE} \cdot S_{GE} + d_{GE} \\ \gamma_{GE} = e_{GE} \cdot \exp(f_{GE} \dots S_{GE}) \end{cases} \quad (2.12)$$

### C. Régulation de la tension et de fréquence du générateur Diesel

Les générateurs Diesel sont contrôlés en vitesse (fréquence de l'onde de tension générée) et en tension. Le régulateur de vitesse agit sur l'actionneur qui à son tour agit sur le moteur Diesel alors que le régulateur de tension agit sur la machine synchrone pour maintenir constante la tension alternative de sortie à sa valeur de référence.

$$U_{GD_i, nomAC} = \frac{q_{GD}(t)}{\sqrt{3} \times \cos(\varphi_i) \times (I_{GD_i max} \times (\alpha + x_{GD_i}(t) + \beta))} \quad (2.13)$$

Les références de vitesse et tension du générateur Diesel dépendent du mode de fonctionnement du générateur. Si le générateur travaille en mode ilote dans système hybride un micro réseau dont il est le seul responsable pour contrôler les paramètres principaux du réseau, les références sont imposées aux valeurs nominales de la vitesse et la tension (1 p.u.). Si le générateur travaille en parallèle avec le réseau principal, les paramètres du système sont imposés par le réseau et le générateur est contrôlé en puissance. Le contrôleur de puissance active et puissance réactive calcule respectivement les références de vitesse et tension pour les régulateurs. Dans le cas de la vitesse, établie à la fréquence imposée du réseau, une erreur de vitesse transitoire apparaît entre la vitesse de référence (imposée par le contrôleur de puissance) et la vitesse réelle. Pourtant, cette erreur fait augmenter ou diminuer la quantité de combustible de façon à augmenter ou diminuer la puissance générée jusqu'à arriver à injecter la puissance de référence [18].

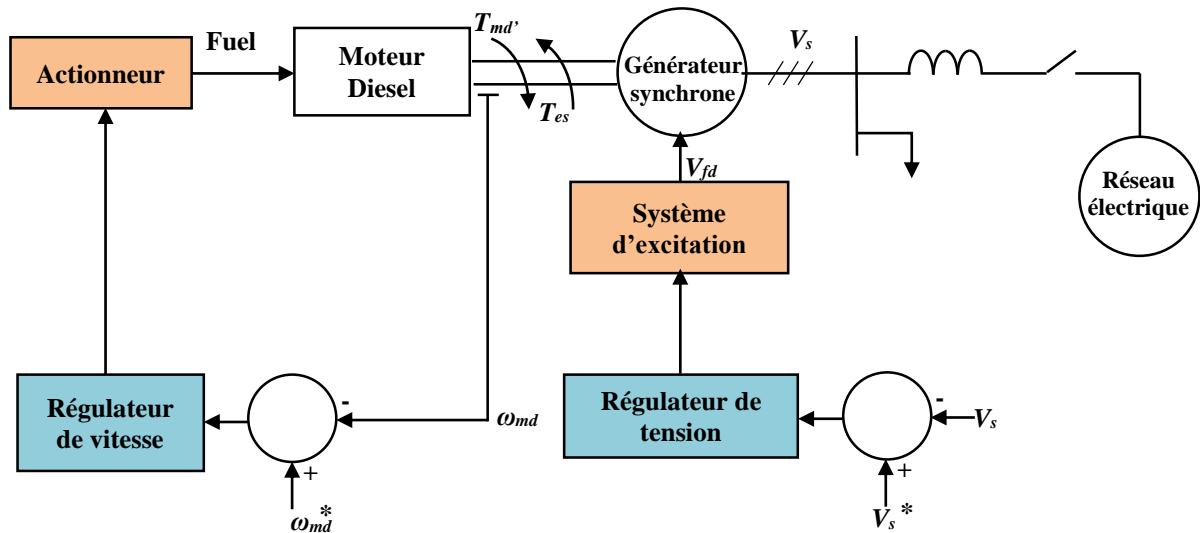


Figure 2.10 : Schéma bloc d'un générateur Diesel avec ses contrôleurs [18]

La régulation de la vitesse du moteur Diesel est réalisée par un régulateur de vitesse et l'actionneur. Le régulateur de vitesse mesure la vitesse réelle du moteur Diesel et il la compare avec la vitesse de référence. En fonction de l'erreur existante il agit sur l'actionneur pour qu'il injecte plus ou moins de combustible. Si le régulateur de vitesse est de type proportionnel, la régulation de vitesse est réalisée avec des courbes de statisme. Dans ce type de régulation, la vitesse du générateur Diesel diminue avec le pourcentage de charge (Figure 2.11 gauches). Si le régulateur est de type proportionnel intégral (PI), l'erreur de vitesse est annulée en régime permanent et la régulation de vitesse est réalisée en mode isochronique, c'est-à-dire que la vitesse de la machine est maintenue constante indépendamment du pourcentage de charge (Figure 2.11 droite). La pratique actuelle est d'utiliser des contrôles en mode isochronique [18]

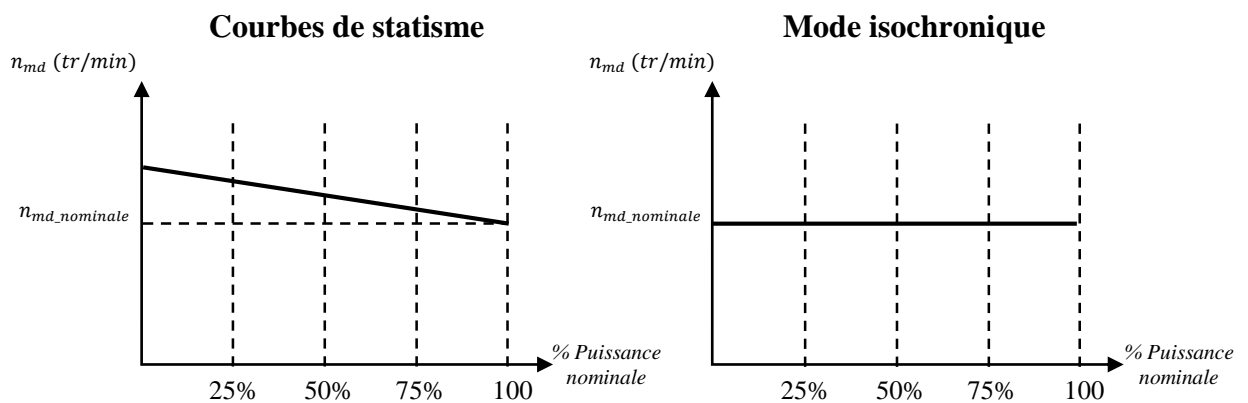


Figure 2.11 : Régulation de vitesse d'un générateur Diesel avec de courbes de statisme (gauche) et en mode isochrone (droite)

## 2.12. Modélisation mathématique de GSAP

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine diesel

### 2.12.1. Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la *FMM* créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encochage est négligeable [19].

### 2.12.2. Description mathématique de GSAP

Avant de modéliser la GSAP on donne une généralité sur le système triphasé avec les nombres complexes (suivant le phaseur). La figure 2.12 illustre les trois courants. Nous avons un vecteur complexe qui circule avec la fréquence du stator  $\omega_s$  qui est une projection des trois courants de phase.

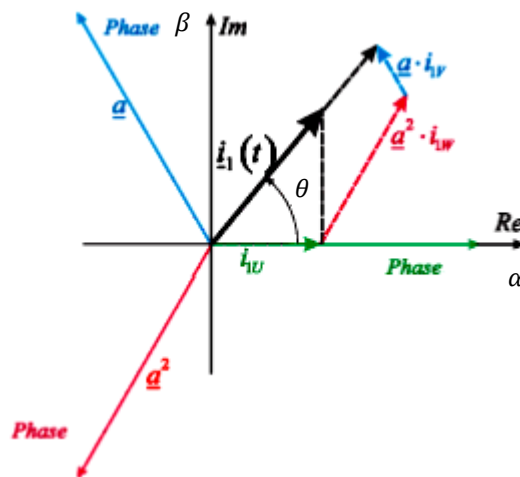


Figure 2.12 : le système triphasé dans le plan complexe.

Les autres quantités triphasées sont obtenues de manière similaire en introduisant des vecteurs spatiaux.

La relation entre les courants triphasés et le vecteur spatial est la suivante :

$$\underline{i}_s^s = \frac{2}{3} (\underline{i}_a + \underline{a}i_b + \underline{a}^2i_c) \quad (2.14)$$

$\alpha$  : est l'opérateur spécial, où,  $\alpha = e^{j2\pi/3}$  le vecteur spatial sera alors :

$$I_s^s = I_s e^{j\omega t + \psi_m} \quad (2.15)$$

Avec :

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt \quad (2.16)$$

L'équation (2.15) pour la transformation  $(d, q)$  est donnée par :

$$i_s = i_s^s e^{-j\theta(t)} = i_{sd}(t) + j i_{sq}(t) \quad (2.17)$$

Et pour la transformation inverse en coordonnées  $(\alpha, \beta)$  est alors :

$$i_s^s = i_s e^{j\theta(t)} = i_{s\alpha}(t) + j i_{s\beta}(t) \quad (2.18)$$

Et la même chose pour l'équation de la tension [20].

Lorsque la génératrice débite sur une charge, les tensions disponibles à la sortie s'expriment par les relations (2.19). La réaction magnétique d'induit, est évoquée lorsque les enroulements stator sont parcourus par un courant. Une distorsion magnétique due à l'entrefer et à ces courants statoriques provoque une déformation du champ tournant initial. Nous supposons que la répartition de l'entrefer est uniforme, que la machine est parfaitement symétrique et négligeons-les distorsions magnétiques [21].

La tension du stator de GSAP a pôle lisse est donnée par :

$$u_s^s = R_s i_s^s + \frac{d\psi_s^s}{dt} \quad (2.19)$$

L'équation du flux de stator est écrite par :

$$\psi_s^s = L_s i_s^s + \psi_m^s \quad (2.20)$$

Le flux de rotor est donné par :

$$\psi_m^s = \psi_m e^{j\theta_r} \quad (2.21)$$

La dérivée de flux statorique est donnée par :

$$\frac{d\psi_s^s}{dt} = L_s \frac{di_s^s}{dt} + j\omega_r \psi_m e^{j\theta_r} \quad (2.22)$$

Avec  $\omega_r$  la vitesse angulaire électrique, on remplace l'équation (2.22) dans (2.19) on trouve :

$$L_s \frac{di_s^s}{dt} = u_s^s - R_s i_s^s - j\omega_r \psi_m e^{j\theta_r} \quad (2.23)$$

En supposant une orientation de champ parfaite, l'équation (2.23) dans les coordonnées  $(d, q)$  est alors [15] :

$$L_s \frac{di_s}{dt} = u_s^s - (R_s + j\omega_r L_s) i_s^s - j\omega_r \psi_m \quad (2.24)$$

Le principe du passage des composantes triphasées aux composantes de Park liées au rotor. L'avantage principal de cette transformation est que, lorsque les grandeurs de la machine sont sinusoïdales et équilibrées, leurs valeurs dans ce référentiel sont constantes. Cette méthode constitue un outil fort commode pour l'étude des régimes permanents et transitoires ainsi qu'un excellent moyen de modélisation en vue de la commande. [20]

Fractionner l'équation (2.24) dans les directions  $(d, q)$  donne :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{-R_s}{L_{sd}} i_{sd} + \omega_r \frac{L_{sq}}{L_{sd}} i_{sq} + \frac{1}{L_{sd}} u_{sd} \quad (2.25)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{-R_s}{L_{sq}} i_{sq} - \omega_r \left( \frac{L_{sd}}{L_{sq}} i_{sd} + \frac{1}{L_{sq}} \psi_f \right) + \frac{1}{L_{sq}} u_{sq} \quad (2.26)$$

Le couple électromagnétique suivant l'axe  $(d, q)$  est écrit par la formule suivante :

$$\tau_{em} = \frac{3n_p}{2} \left[ \psi_m i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} \right] \quad (2.27)$$

L'équation mécanique peut être écrite :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3n_p}{2} \left[ \psi_m i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} \right] - \frac{f_v}{J} \psi_r - \frac{\tau_l}{J} \quad (11.28)$$

L'équation (2.23) dans les coordonnées  $(\alpha, \beta)$  est alors :

$$L \frac{di_s}{dt} = -R_s i_s + \hat{\omega}_1 \varphi_{pm} (-\sin \theta + j \cos \theta) - u_s \quad (11.29)$$

Le passage du repère triphasé statorique au repère diphasé  $(\alpha, \beta)$  lié au stator est effectué en utilisant la matrice restreinte de Concordia  $T_l$  [21].

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa}(t) \\ i_{sb}(t) \\ i_{sc}(t) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Cette dernière est orthonormée et conserve la puissance. L'intérêt de cette transformation réside dans la réduction de 3 à 2 l'ordre du système. En prenant l'axe de symétrie de la phase 1 comme origine [23], Le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents dans l'axe de repère lié au stator  $(\alpha, \beta)$ , peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} u_{\alpha} = -R_s i_{\alpha} - L_s \frac{di_{\alpha}}{dt} + E_{\alpha} \\ u_{\beta} = -R_s i_{\beta} - L_s \frac{di_{\beta}}{dt} + E_{\beta} \end{cases} \quad (2.31)$$

où  $u_{\alpha\beta}$  sont les tensions statoriques,  $R_s$  est la résistance statorique,  $L_s$  est l'inductance statorique,  $i_{\alpha\beta}$  sont les courants statoriques et  $E_{\alpha\beta}$  sont les forces électromotrices qui peut être donné par:

$$\begin{cases} E_{\alpha} = -\omega_r \Phi_{pm} \sin \theta \\ E_{\beta} = -\omega_r \Phi_{pm} \cos \theta \end{cases} \quad (2.32)$$

Avec  $\omega_r$ ,  $\theta$  et  $\Phi_{pm}$  est la vitesse rotorique, la position de rotor et le flux magnétique respectivement. Le couple électromagnétique suivant l'axe  $(\alpha, \beta)$  est écrit par la formule suivante :

$$\tau_{em} = n_p K_e (i_{\beta} \cos \theta - i_{\alpha} \sin \theta) \quad (2.33)$$

L'équation mécanique suivant  $(\alpha, \beta)$  peut être écrite :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = n_p K_e (i_{\beta} \cos \theta - i_{\alpha} \sin \theta) - \frac{f_v}{J} \omega_s - \frac{\tau_t}{J} \quad (2.34)$$

$K_e = \sqrt{\frac{3}{2}} \Phi_{pm}$  est le constant de FEM et  $n_p$  est le nombre de pair de pôle [22].

La puissance apparente totale  $S$  fournie par la génératrice dans le repère  $(d, q)$  est :

$$S = 3(u_d i_d + u_q i_q) + j3(u_d i_d - u_q i_q) \quad (2.35)$$

L'expression de la puissance transmise est donnée par :

$$p(t) = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \quad (2.36)$$

En remplaçant  $V_d$  et  $V_q$  par leurs expressions dans (2.36), on obtient :

$$p(t) = \frac{3}{2} \left[ -R_s (i_d^2 - i_q^2) - (i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)) \right] \quad (2.37)$$

$\frac{3}{2} R_s (i_d^2 - i_q^2)$  : représente la puissance dissipée par l'effet de Joule.

$\frac{3}{2} (i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt})$  : La variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \frac{d\theta_r}{dt} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)$  : Puissance électromagnétique ( $P_{em}$ ) [20].

### 2.13. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur le système d'énergie hybride (S.E.H) qui combine deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie les générateurs photovoltaïques et les générateurs diesel et les différentes configurations des systèmes hybrides avec leurs avantages et inconvénients. Enfin, nous donnerons la modélisation du générateur diesel ainsi que la modélisation mathématique de la GSAP.



# **Chapitre 3**

Simulation d'un système de  
production photovoltaïque  
associé à un générateur diesel

### 3.1. Introduction :

Le but d'une centrale hybride PV/diesel est d'assurer l'énergie demandée par la charge et de produire le maximum d'énergie à partir de la source PV. Les performances d'un système hybride PV/diesel, le rendement et la durée de vie, sont influencées en partie par sa conception (dimensionnement des composants, et la stratégie de gestion) et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement (gestion et contrôle de système). Le but de modélisation de système PV/Diesel est de démontrer par approche numérique, le gain que peut apporter par le jumelage PV/Diesel au niveau de la consommation en carburant du générateur Diesel.

Afin d'étudier en détail le fonctionnement d'un centrale hybride PV/Diesel, nous étudions la modélisation des principaux composants du système hybride PV/Diesel. En outre, nous essayons de dimensionner et élaborer une stratégie de gestion de la centrale hybride PV/Diesel.

Finalement, nous présentons le modèle de simulation complet de notre étude. Les résultats obtenus seront analysés et discutés.

### 3.2. Modélisation d'un module photovoltaïque

#### 3.2.1. Modélisation d'une cellule solaire

##### a- Cas idéal

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme :

$$I = I_{cc} - I_D = I_{cc} - I_0 \left( e^{\frac{qv}{kt}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Avec Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire est :

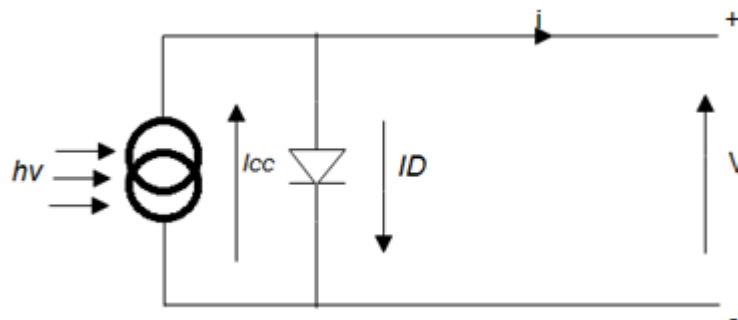


Figure 3.1 : Cellule solaire idéale [24]

$I, V$  : Courant et tension fournis par la cellule.

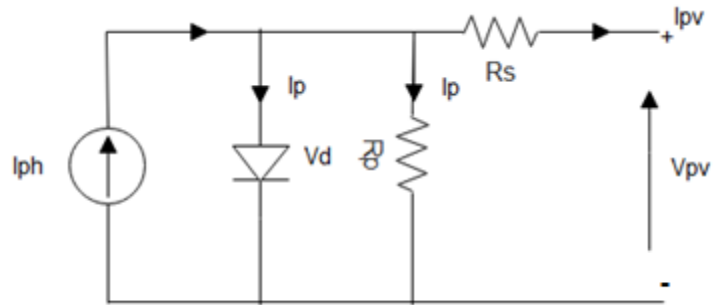
$I_D$  : Courant de diode donnée par :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qv}{kT}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

**b- Cas réel**

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (3.2).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant ( $I_{ph}$ ) caractérisant le photo-courant, une résistance série ( $R_s$ ) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte ( $R_{sh}$ ) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ( $R_s$ ) [24].



**Figure 3.2** : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV [24].

En notent :

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (3.3)$$

avec :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V+R_s I}{nV_T}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

$$I_p = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (3.5)$$

$$I_0 = \frac{I_{cc}}{\left( e^{\frac{V_{cc}}{nV_T}} - 1 \right)} \quad (3.6)$$

$$I_{cc} = I_{ccr} \left( \frac{G}{1000} \right) \quad (3.7)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3.8)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V+R_s I}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (3.9)$$

La photopile réelle à une résistance série  $R_s$  dont l'influence est plus forte lorsque l'appareil fonctionne dans la région de source de tension, et une résistance parallèle  $R_p$  ayant une influence plus grande dans la région de fonctionnement en source de courant.

La caractéristique (I-V) de la photopile représentée sur la figure (3.3) dépend de ses caractéristiques internes ( $R_s, R_p$ ) et des facteurs externes comme l'irradiation et la température.

Dans les modèles photovoltaïques, on suppose généralement que  $I_{ph} = I_{cc}$  parce que dans la photopile réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée [24].

Donc l'équation devienne :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V+R_s I}{nV_T}} - 1 \right) \quad (3.10)$$

### 3.2.2. Caractéristique I=f (V) d'une cellule solaire

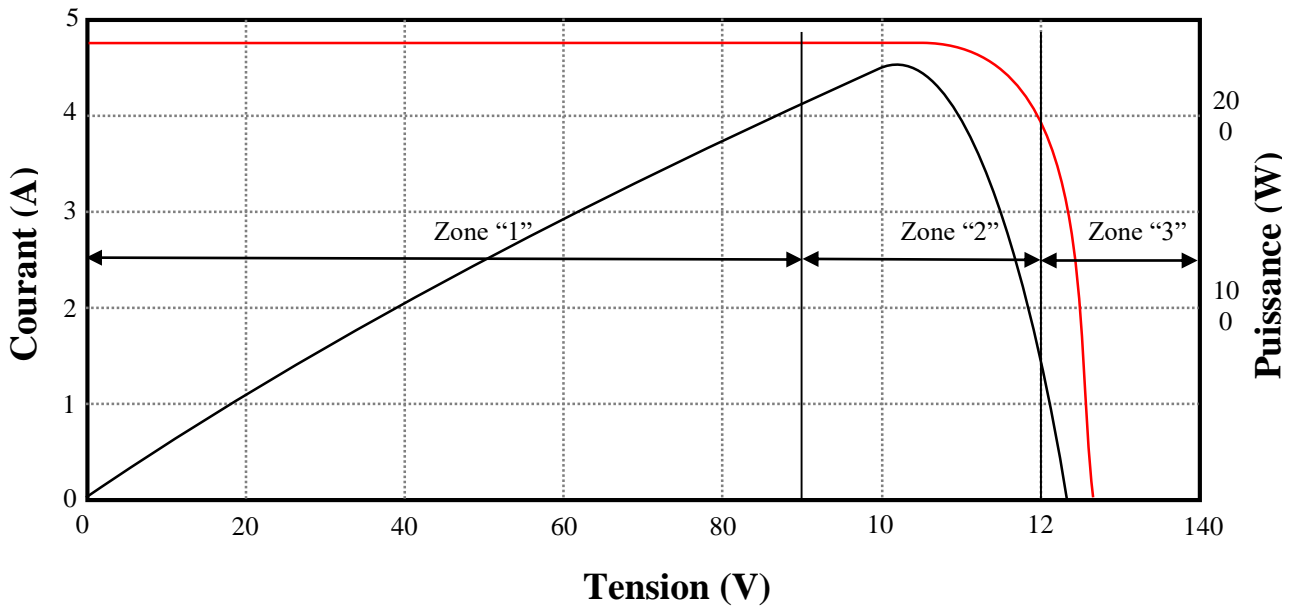


Figure 3.3 : Caractéristique I=f (V) [25]

La caractéristique  $I = f(V)$  représente la courbe de puissance, sachant que le courant généré est donné par la formule (3.9) et que la cellule fonctionne sous un éclairage fixe  $E$  et une température constante  $T$ .

Le fonctionnement du module est caractérisé essentiellement par trois zones :

- **La zone (1)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant. [25].
- **La zone (2)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (3)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

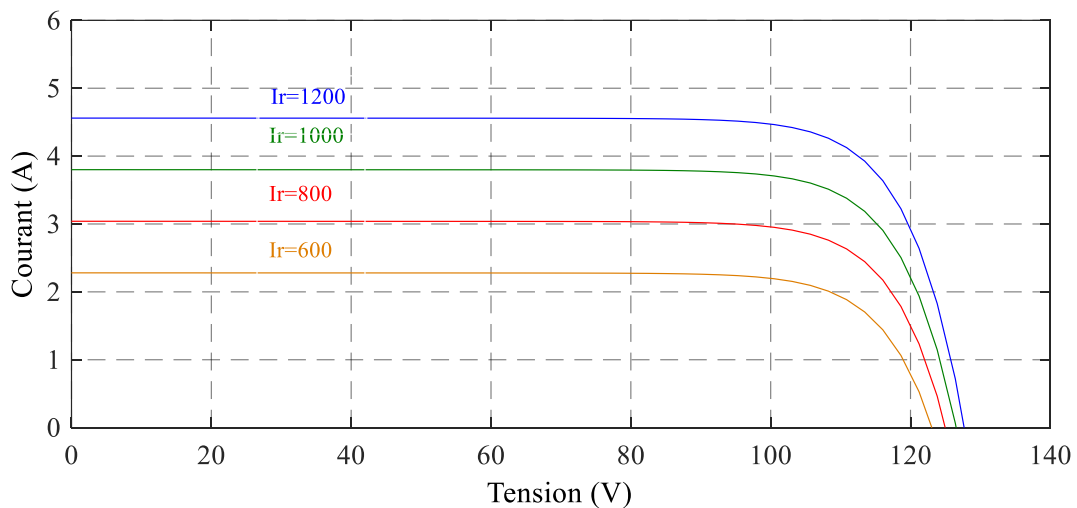


Figure 3.4 : Caractéristiques tension-courant du générateur photovoltaïque

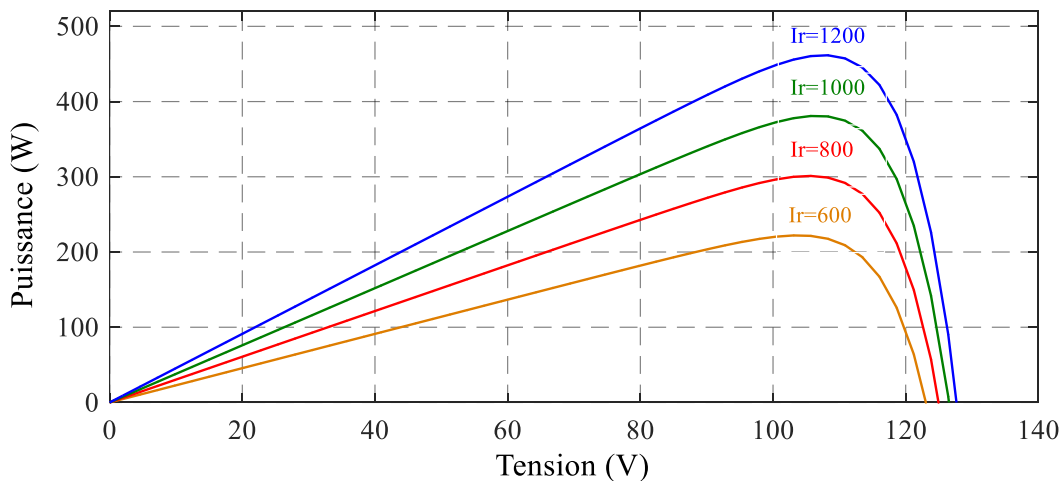


Figure 3.5 : Caractéristiques tension-puissance du générateur photovoltaïque

### 3.3. Impact de l'électronique de puissance dans la gestion énergétique

#### 3.3.1. Convertisseurs statiques

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent

rencontrés dans les SEH : Les redresseurs (AC/DC), Les onduleurs (DC/AC) et Les hacheurs (DC/DC).

### 3.3.1.1. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

L'hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. L'hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs.

### 3.3.1.2. Les hacheurs

Hacheur ou convertisseur continu-continu (DC /DC), il permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension et dans certaines conditions, renvoyer de l'énergie à l'alimentation.

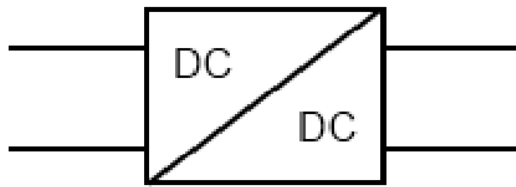


Figure 3.6 : Symbole d'un convertisseur DC-DC

Les trois types les plus utilisés :

- Hacheur buck.
- Hacheur boost.
- Hacheur Buck-Boost.

### 3.3.1.3. Convertisseur DC-AC (onduleur)

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. la forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée

- Onduleur monophasé en demi-point.
- Onduleur monophasé en pont (Pont H)

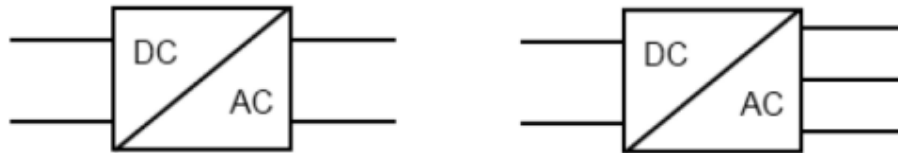


Figure 3.7 : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.

#### 3.3.1.4. Convertisseur AC-DC (redresseur)

Les redresseurs sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative/continu (AC/DC), ils sont alimentés par une source de tension alternative, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie. Ils peuvent être à base de montages redresseurs simple alternance ou en pont.

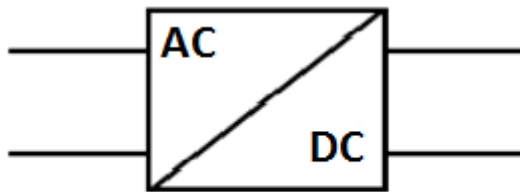


Figure 3.8 : Symbole d'un convertisseur AC-DC

#### 3.3.2. Charges

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

#### 3.4. Système de stockage

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés, dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme. Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb-acide. Les batteries nickel-cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène.

Ces dernières années, l'installation de dispositifs de conversion photovoltaïque est en pleine progression. Ces dispositifs trouvent des applications très diverses comme la fourniture d'électricité domestique, l'alimentation en électricité de capteurs ou de pompes solaires. Le stockage de l'énergie photovoltaïque est principalement assuré par les batteries, même si d'autres moyens sont envisageables. Les batteries ont une énergie massique élevée. Mais elles nécessitent un entretien assez contraignant avec une durée de vie relativement faible (compter 5 à 10 ans) et surtout ne sont pas toujours adaptées à l'usage effectué. Ainsi, des applications photovoltaïques nécessitant des pics de puissance ou la régulation d'une puissance électrique ne peuvent pas être envisagées par de simples batteries ayant une dynamique trop lente. Les appels de puissance importants peuvent être obtenus par la nouvelle génération des supercondensateurs, de densités de puissance plus élevées, apparue dans les années 90. Les supercondensateurs ont commencé à être utilisés pour alimenter de manière ponctuelle et importante des composants à faible énergie spécifique dans les domaines informatiques et des télécommunications. Plus récemment, grâce à leurs temps de réponse de l'ordre de 1 à 10 s et à leur puissance active élevée, les supercondensateurs ont permis le développement des véhicules hybrides, l'énergie de freinage étant récupérée par les supercondensateurs qui la restitue pour les pics de puissance nécessaires au démarrage du moteur.

### **3.5. Simulation**

#### **3.5.1. Couplage et gestion du système**

##### **3.5.1.1. Description du système couplé et son fonctionnement**

La figure 3.9 montre le diagramme relatif au programme Simulink du système hybride (PV, diesel et charge).

Dans ce système la charge électrique relative aux équipements est alimentée par les batteries à travers un convertisseur. Ces batteries sont chargées par le courant débité par le générateur photovoltaïque, le contrôle de leur charge est assuré par un régulateur de charge (hacheur) (voir figure 3.10).

Par ailleurs, dans le cas où il n'y a ni énergie solaire ni énergie de batterie et que la durée de pénurie dépasse la durée d'autonomie du système, ce dernier aura recours au groupe électrogène. Dans le cas où même le générateur diesel tombe en panne, la charge sera coupée automatiquement (voir figure 3.11).



Des lectures de l'état du système et des sorties peuvent être prises n'importe où dans les modèles avec des oscilloscopes Simulink qui affichent ou enregistrent les résultats dans les fichiers de données afin de pouvoir les utiliser dans d'autres outils de simulation où d'affichage.

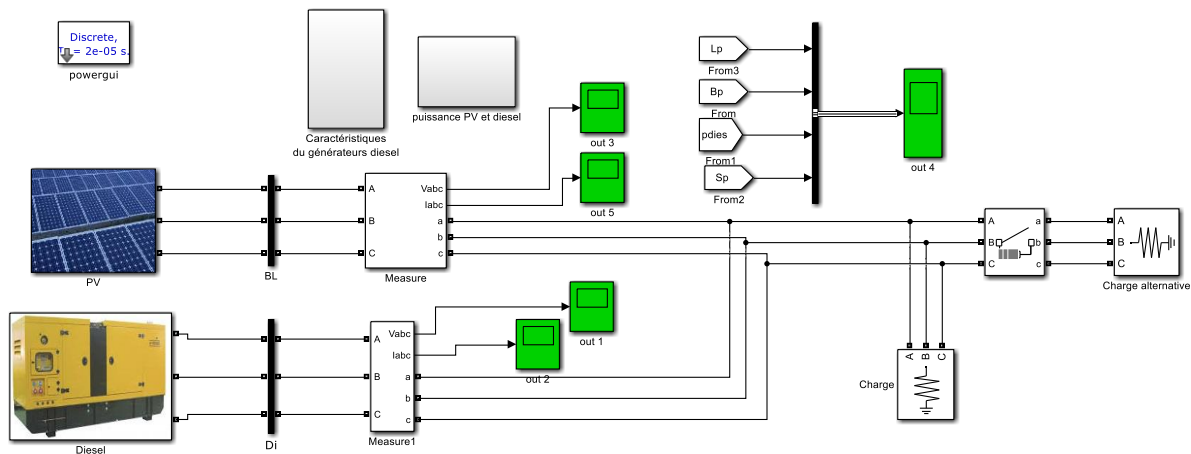


Figure 3.9 : Schéma simulink global de la chaîne de production photovoltaïque associée à un générateur diesel

Les figures ci dessous figures 3.10 et 3.11 représente le schéma block du générateur photovoltaïque couplés à une batterie de stockage et le générateur diesel (moteur diesel et génératrice synchrone) pris de MATLAB.

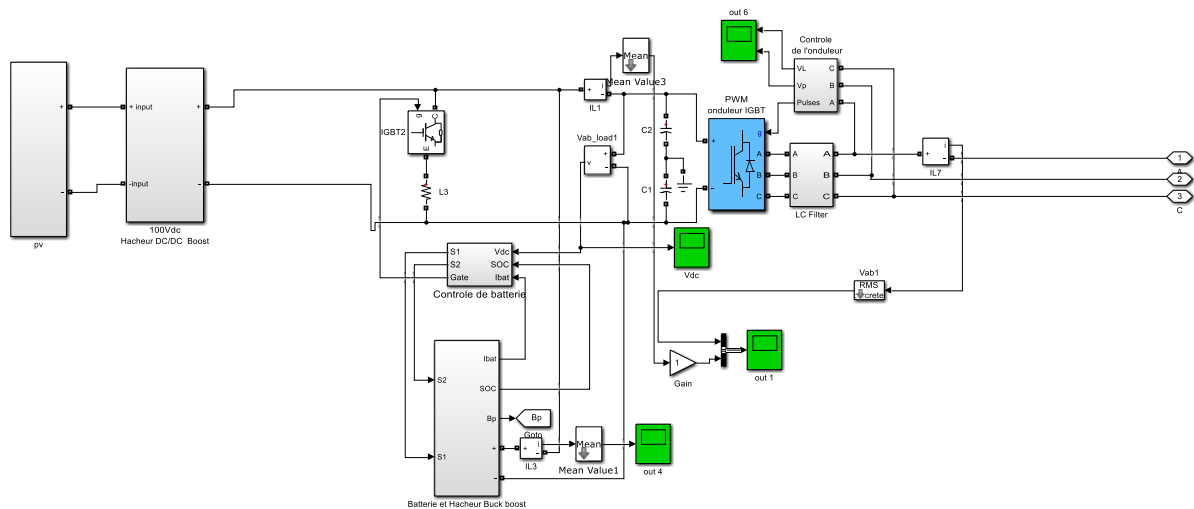


Figure 3.10 : Schéma simulink du générateur photovoltaïque avec un régulateur de tension boost et un onduleur de tension à deux niveaux couplés à une batterie de stockage

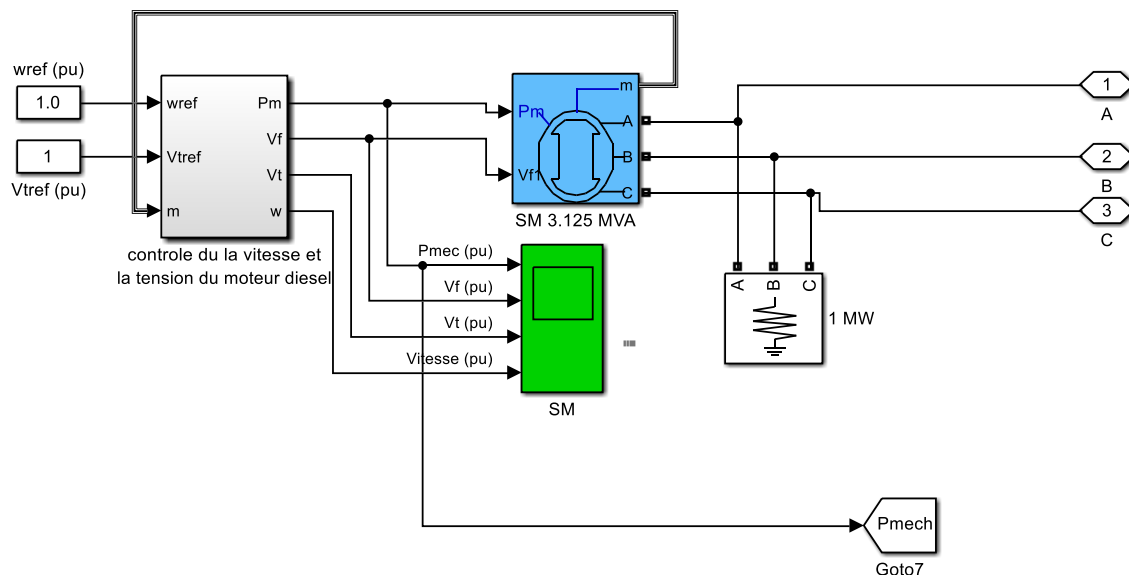


Figure 3.11 : Schéma simulink du générateur diesel (moteur diesel et génératrice synchrone)

### 3.6. Résultats de simulation et interprétations

Pour quelques périodes exceptionnelles où la couverture de la charge représente un faible déficit. Ceci sera couvert par le générateur diesel au lieu d'un ensemble supplémentaire de modules ou d'aérogénérateurs ou au lieu de raccorder le site isolé au réseau de distribution public dont les prix de revient sont relativement important.

A cette couverture, nous devons associer un générateur diesel pour pouvoir remédier au déficit représenté par le système photovoltaïque durant les périodes creuses.

Par ailleurs, nous constatons que non seulement la charge est largement couverte, mais on aura un surplus de production d'énergie qui sera emmagasiné dans des batteries ou des supercondensateurs ou l'injecter dans un réseau public de distribution.

Les simulations effectuées pour vérifier la validité du schéma proposé ont utilisé un système hybride photovoltaïque et comme appoint un générateur diesel. Ce système est intégré à une charge alternative de 15 kW.

La chaîne de production proposée a été évaluée à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink dans des conditions de fonctionnement bien spécifiques (rayonnement solaire, température, fluctuation de charge, basculement entre le générateur photovoltaïque et le générateur diesel). Les paramètres du système proposés sont listés dans les tableaux 1,2 et 3 (voir annexe A).

Le modèle de simulation a été testé sur un cycle de 24 secondes (chaque seconde est l'équivalent d'une heure), pendant le fonctionnement à plusieurs configurations assurant ainsi l'énergie demandée.

Nous illustrons sur les figures suivantes les résultats de simulation obtenus pour un système hybride photovoltaïque / générateur diesel.

Les figures 3.12 et 3.13 montrent respectivement le courant et la tension au niveau de la charge avec leurs zooms, ils sont purement sinusoïdaux ce qui montre l'efficacité de la stratégie de contrôle appliquée au convertisseur qui donne une meilleure qualité d'énergie à la charge. Il est à noter que le courant et la tension produits par le générateur PV présentent des oscillations par rapport à ceux produits par le générateur diesel qui sont purement sinusoïdaux (voir figures 3.17 et 3.18). Ces oscillations sont générées par les interrupteurs du convertisseur statique (l'onduleur) qui ont un caractère non linéaire.

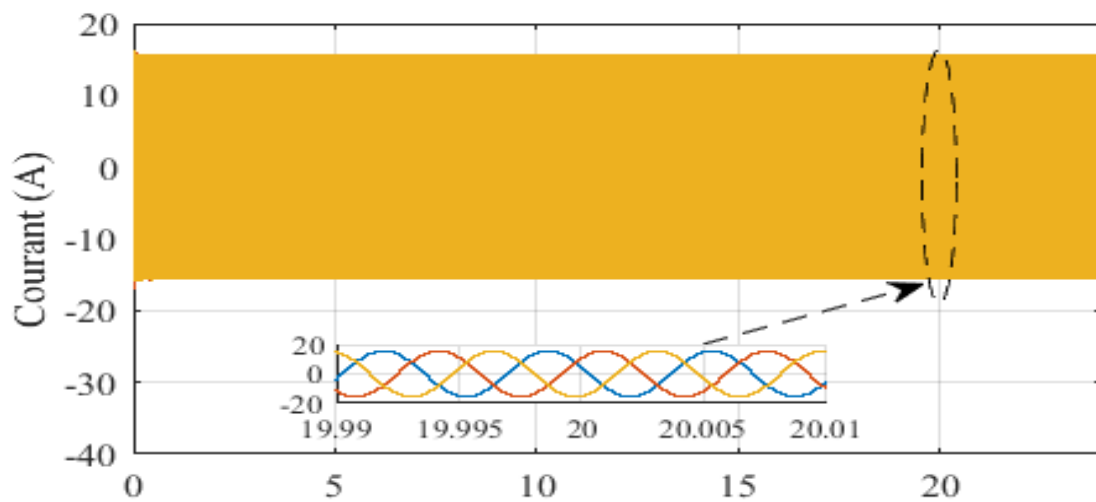


Figure 3.12 : le courant triphasé de la charge

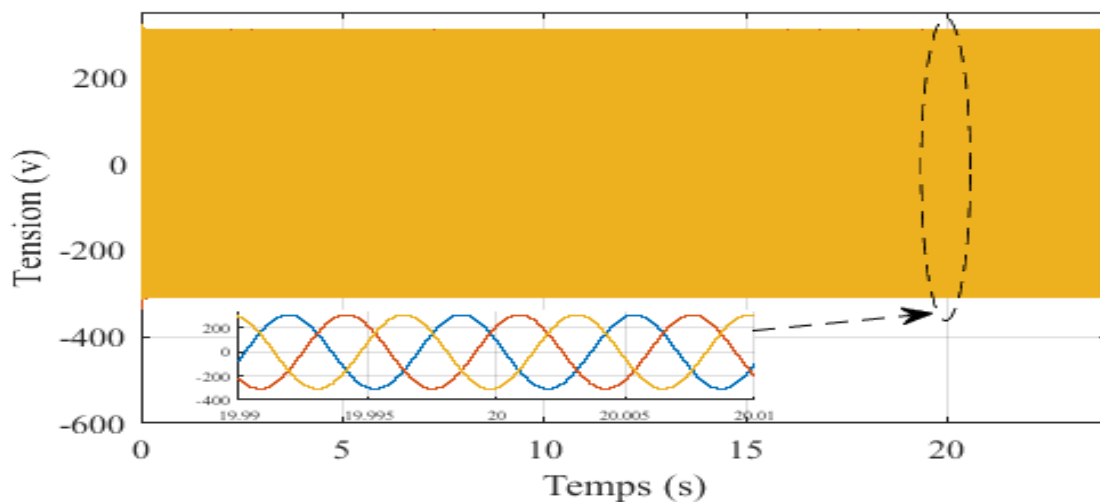
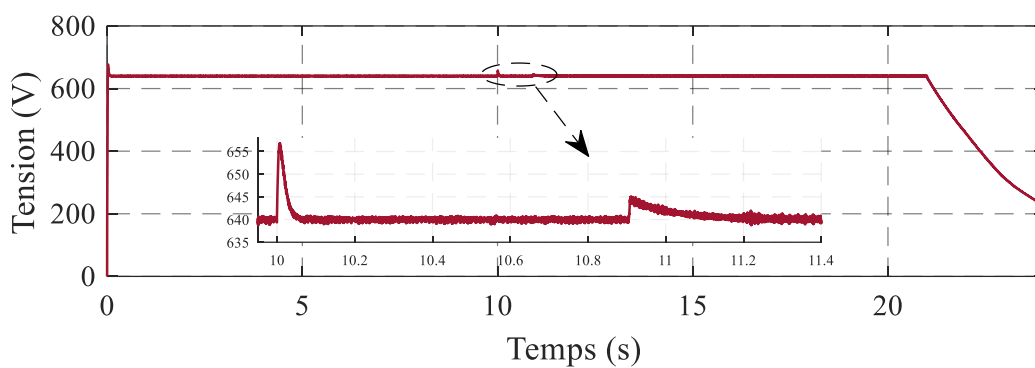


Figure 3.13 : la tension de la charge

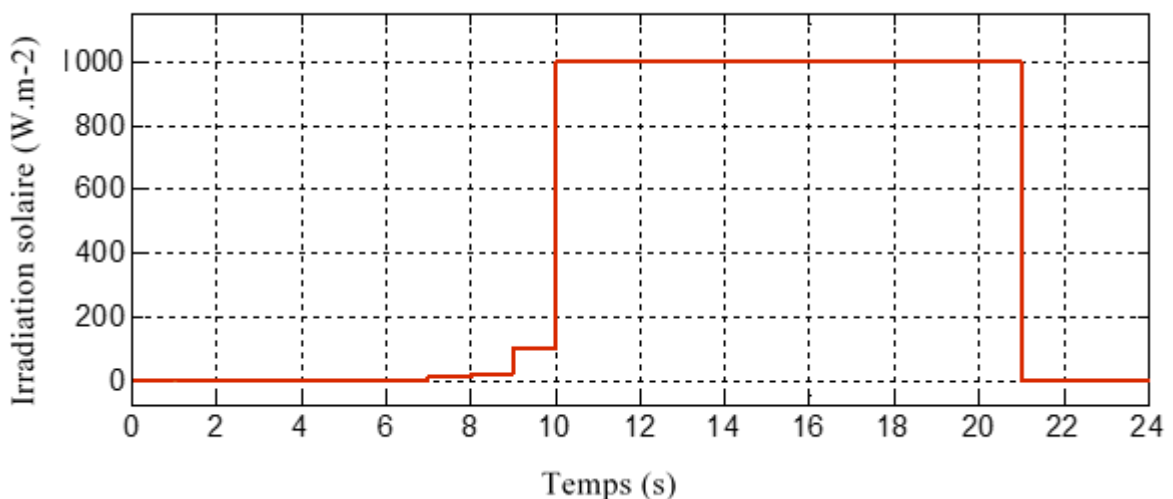
Une mesure importante de la performance du système hybride est la mesure de la tension du circuit intermédiaire entre le convertisseur côté générateur photovoltaïque et le convertisseur côté batterie, comme le montre la figure 3.14.

Ceci dit, on peut voir que l'ondulation de la tension du bus continu intermédiaire est très réduite. La tension moyenne du bus DC est bien maintenue constante à la valeur spécifiée (640 V). On remarque un pic de tension de l'ordre de 15V, il est dû à l'intervention du générateur diesel qui va assurer à lui seul la puissance demandée, tandis que le PV prend le relai de la charge de la batterie (voir figure 3.14).



**Figure 3.14** : la tension du bus continu

La figure 3.15 affiche le profil du rayonnement solaire variable appliqué l'entrée du panneau solaire à une température de 25 °C



**Figure 3.15** : irradiation solaire

Les caractéristiques et les performances du générateur PV (puissance, courant et tension) sont illustrées dans les figures 3.16, 3.17 et 3.18 respectivement

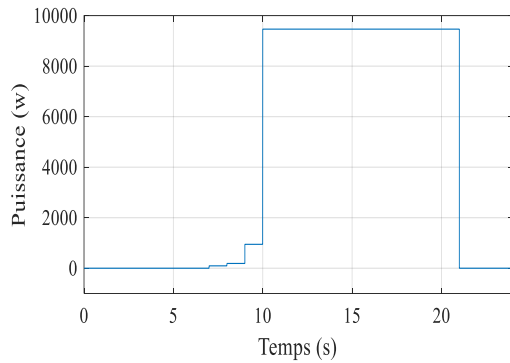


Figure 3.16 : la puissance du générateur PV

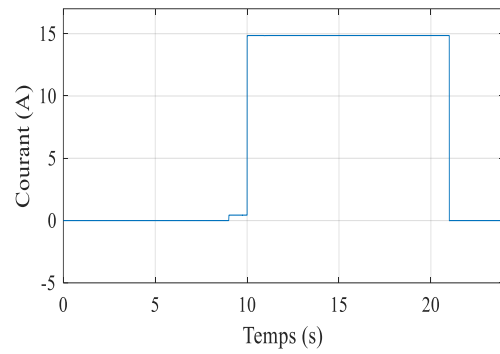


Figure 3.17 : le courant du générateur PV

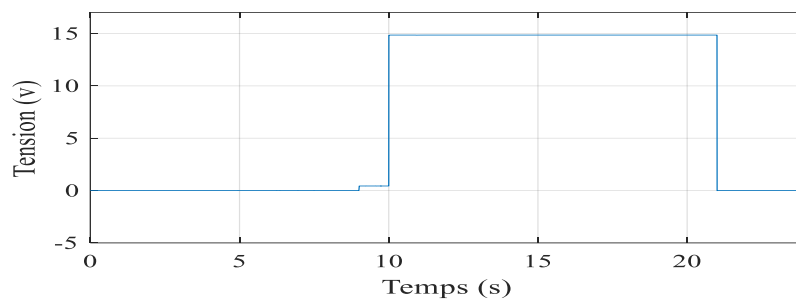


Figure 3.18 : la tension du générateur PV

On note que les trois figures (3.16, 3.17, 3.18) ont le même profil (le profil d'irradiation solaire)

Initialement, entre  $t = 0$  h et  $t = 10$  h l'irradiation solaire égale à 0 donc la puissance, le courant et la tension du générateur PV égale à 0

Entre  $t = 10$  h et  $t = 21$  h l'irradiation est maximale, la puissance, le courant et la tension est maximale

Finalement, entre  $t = 21$  h et  $t = 24$ h l'irradiation est nul en conséquence les caractéristique (puissance, courant et tension) sont nul

Les caractéristiques du générateur diesel (puissance, courant, tension, couple et vitesse) sont affichées dans les figures 3.19 à 3.23 respectivement

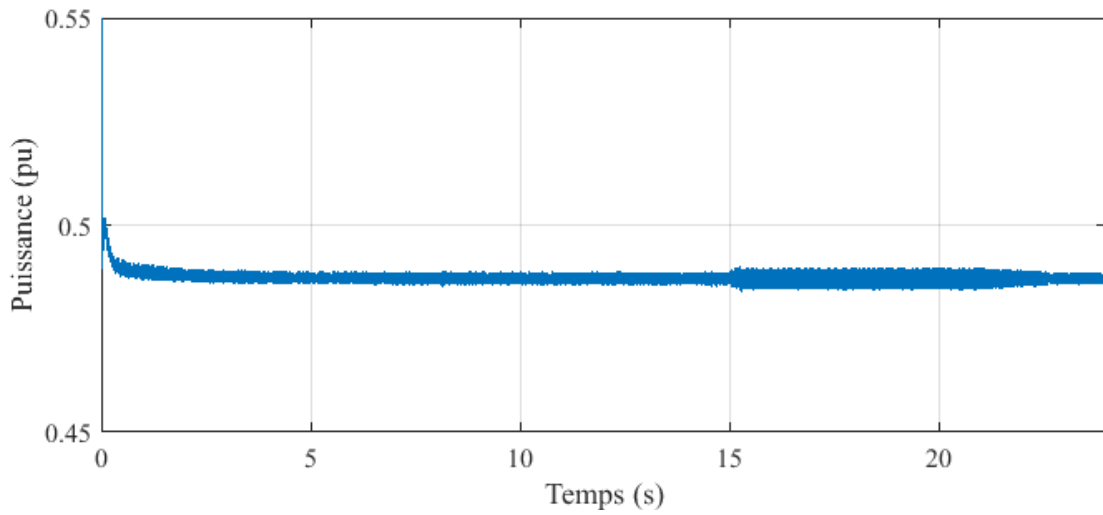


Figure 3.19 : la puissance du générateur diesel

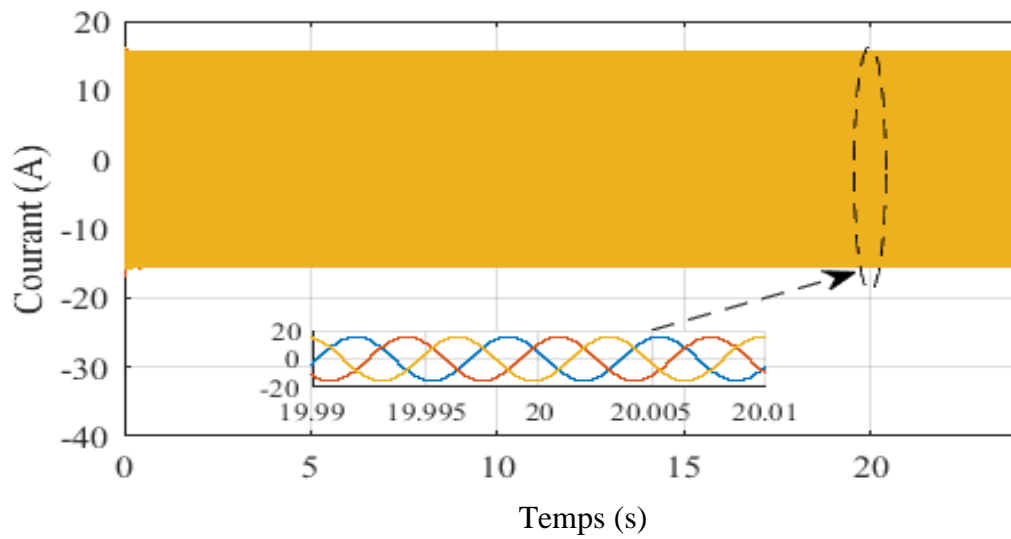


Figure 3.20 : Courant du générateur diesel

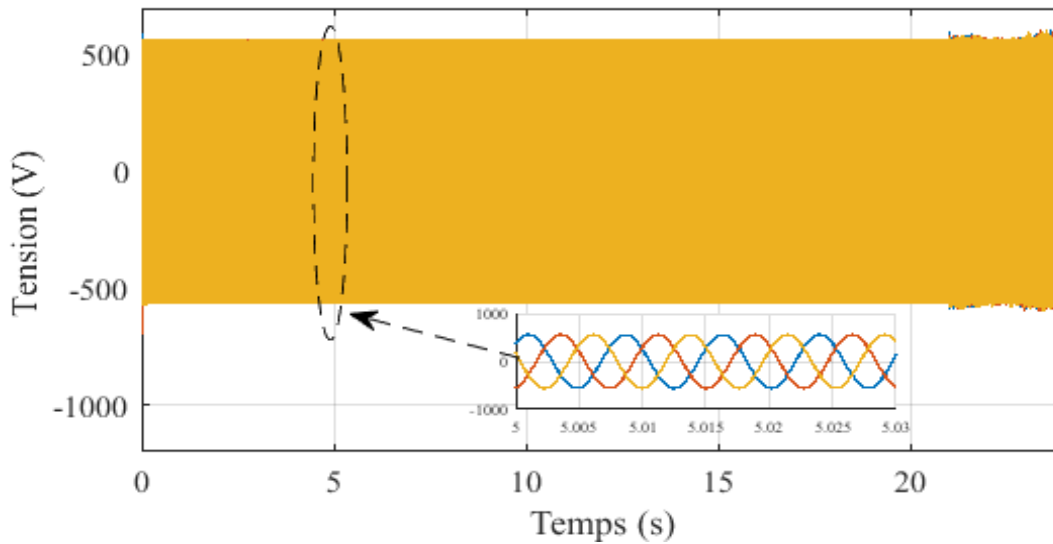


Figure 3.21 : la tension du générateur diesel

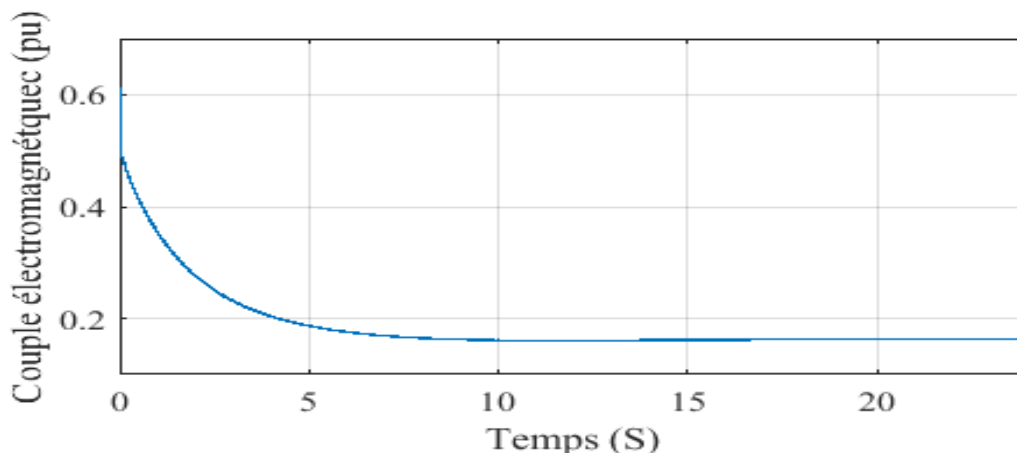


Figure 3.22 : le couple du générateur diesel

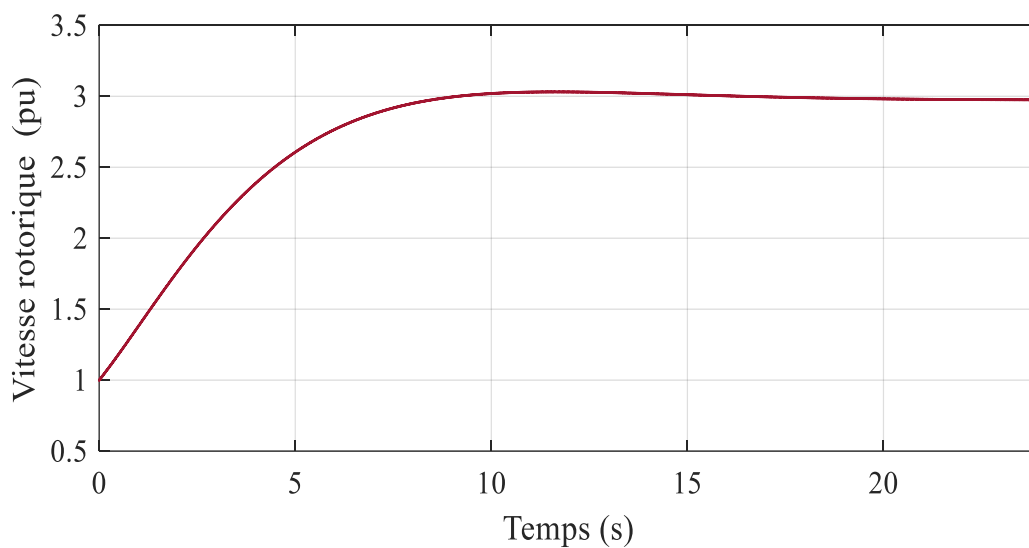


Figure 3.23 : la vitesse rotorique du générateur diesel

Les figures 3.24 et 3.25 montrent les performances de la batterie (courant, SOC) respectivement

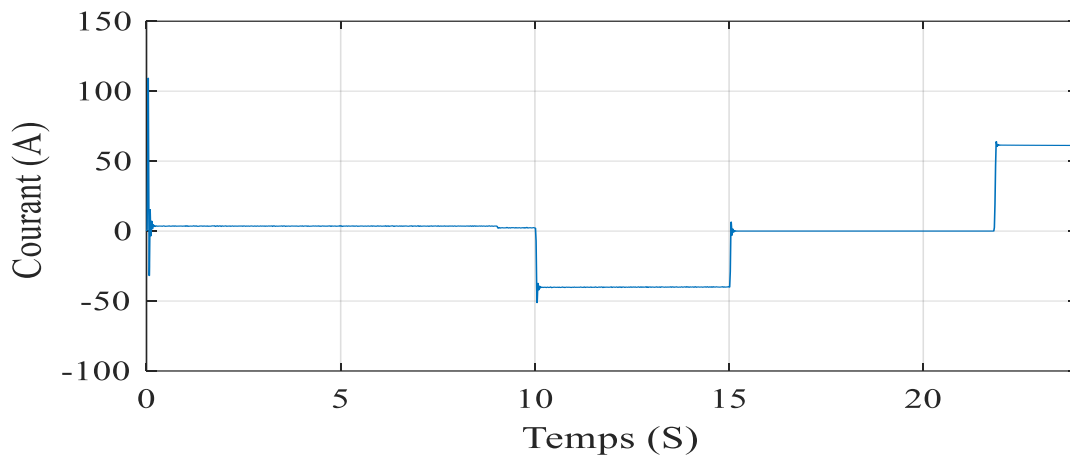


Figure 3.24 : le courant de la batterie

Le SOC du périphérique de stockage est illustré à la Figure 3.25. Le SOC est chargé à 60% à l'instant  $t=0$  et le système est à pleine charge. Lorsque la puissance totale produite par le PV et le générateur diesel est supérieure à la puissance demandée, le dispositif de stockage est éteint dans ce cas. Lorsque le système est dans un état critique, le SOC continue de diminuer, ce qui permet au superviseur de réagir correctement à cette situation et donc de couper la charge avec la priorité la plus basse afin de sauver l'équilibre de l'ensemble du système. Face à la situation de manque d'électricité, il est essentiel d'introduire la technique de délestage, donc tous les dispositifs de stockage seraient déconnectés. Sinon, le mode de charge du système de stockage est autorisé. Ces résultats montrent l'efficacité de la gestion de l'énergie en plus des techniques de contrôle utilisées pour ce système hybride.

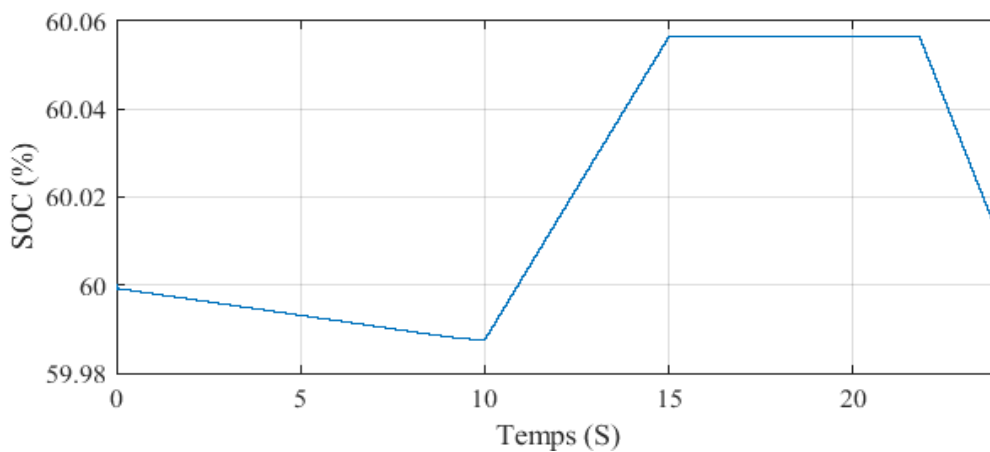
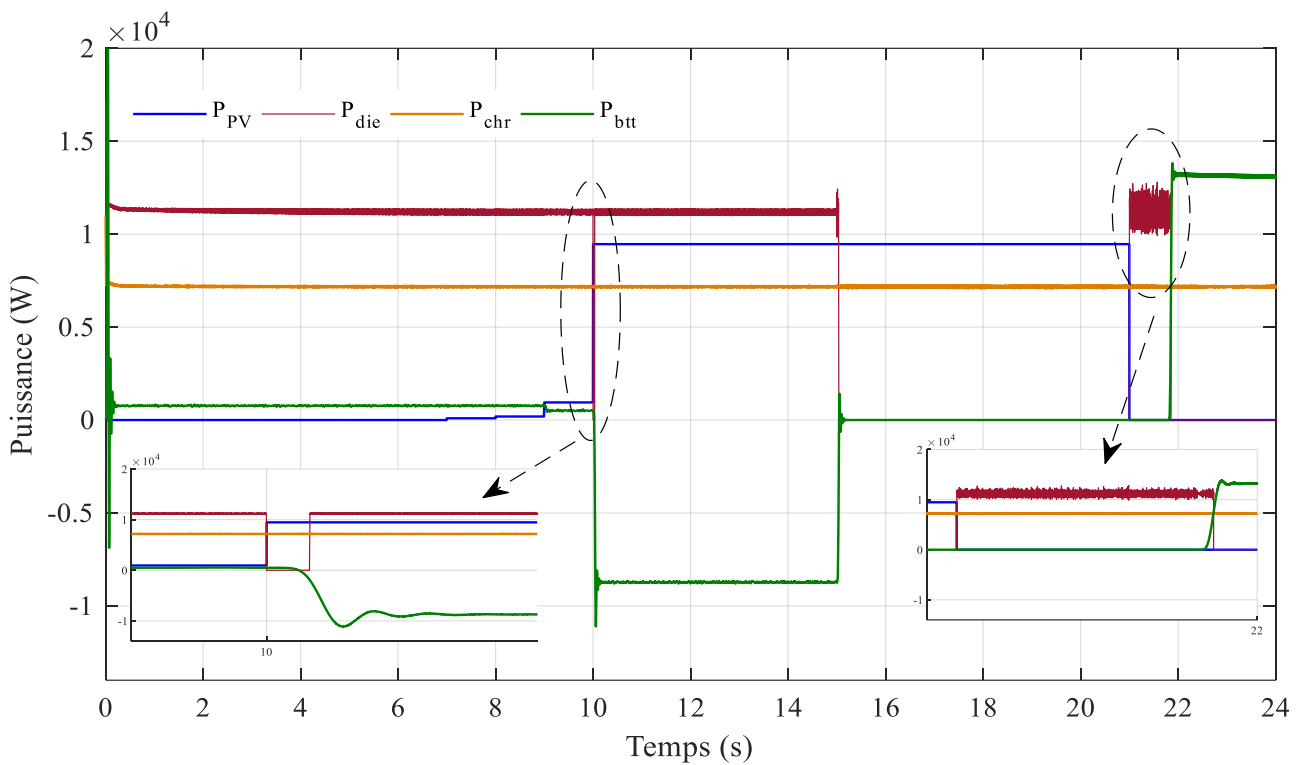


Figure 3.25 : SOC





**Figure 3.26 :** la distribution d'énergie (charge, PV, diesel et batterie).

La figure 3.26 montre la distribution d'énergie (charge, PV, diesel et batterie). Initialement, entre  $t = 0$  h et  $t = 7$  h. Le générateur diesel alimente la charge, le PV et la batterie sont déconnectés. A  $t = 7$  h, le PV commence à fonctionner progressivement pour alimenter la charge simultanément avec le générateur diesel, la batterie est toujours déconnectée.

On remarque qu'à  $t = 9$  h, la batterie commence à se charger par le générateur PV.

A  $t=10$  h, on constate que le générateur diesel a cessé de fonctionner puis se redémarre rapidement suite à la demande au niveau de la charge, dans cette période (entre  $t= 10$  h et  $t= 15$  h) les deux générateurs sont en service et la batterie se charge à partir du PV.

Le générateur diesel se déconnecte à  $t=15$  h, la batterie étant chargée, dans cette période c'est le PV qui assure l'alimentation en énergie à la charge.

Une simulation de défaut de batterie a été introduite à  $t=21$  h pendant une période de 60 minutes, on remarque que le générateur diesel entre en service subitement pour compenser l'énergie demandée. Dans la même période le PV est en arrêt.

La batterie revient en service à  $t=22$  h et alimente la charge, ce qui permet au générateur diesel de se mettre en arrêt jusqu'à  $t=00$ h.

**3.7. Conclusion :**

L'étude présentée dans ce chapitre concerne les systèmes de production d'électricité d'un fonctionnement autonome. Ces dispositifs semblent amenés à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et d'un meilleur respect de l'environnement.

Notre travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système hybride moyennant le logiciel Simulink. (MATLAB) qui nous a permis de représenter le système sous forme de diagramme en blocs. L'exemple de simulation a été appliqué à un site quelconque et les données météorologiques (rayonnement solaire, la température ambiante, la durée d'insolation et la puissance de la charge) sont choisies selon un cahier de charge.

D'après l'analyse faite sur les résultats de simulation obtenus, la combinaison des deux sources d'énergies reliées à un système d'appoint (générateur diesel) engendre un profit énergétique considérable et une continuité de service assurée (présence quotidienne de l'alimentation).

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'étude et la gestion énergétique d'un système multi-sources de génération électrique à base d'un générateur PV et diesel.

Les travaux ont eu pour but d'utiliser les possibilités offertes par la technologie de l'hybridation pour la maximisation du rendement du générateur PV/diesel/batterie et l'harmonisation de son fonctionnement sous différents scénarios et différents modes de fonctionnements.

Dans le premier chapitre, nous avons donné une généralité sur les énergies renouvelables notamment l'énergie photovoltaïque et leur avantage et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous avons mené à bien une étude sur les différentes configurations des système hybride. Les éléments du générateur diesel (moteur et génératrice synchrone) été modélisés afin de faire une simulation numérique.

Le chapitre 3 a porté un bref aperçu sur la modélisation du générateur photovoltaïque, l'impact des convertisseurs statiques et les systèmes de stockages dans la mise œuvre et la flexibilité des systèmes de production hybride.

A la fin des travaux de ce mémoire on estime avoir contribué à :

- La modélisation et la simulation dynamique d'une alimentation multi-sources PV/Diesel qui permet le soutient d'un réseau ou l'alimentation des charges isolées sous différents scénarios.
- La gestion énergétique de l'ensemble (PV, diesel et batterie)
- L'analyse de la qualité des tensions et des courants injectés au réseau et surtout l'effet des oscillations dues aux convertisseurs statiques.
- La simulation dynamique en utilisant Matlab/Simulink. Les résultats obtenus sont très encourageants.

Les perspectives du travail de recherche de ce mémoire sont ouvertes. Elles peuvent viser à court terme l'étude du comportement de la microcentrale sur un banc d'essai expérimental (émulateur) en utilisant des convertisseurs de puissance avancés et leurs stratégies de commande intelligentes associées. A long terme, on peut envisager de valider l'étude proposée sur un site réel.

# **Références bibliographiques**

### Références bibliographiques

- [1] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-une-energie-renouvelable> consulté le 15/08/2020 à 10 :30
- [2] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-eolienne> consulté le 15/08/2020 à 10 :30
- [3] [http://www.motiva.fi/myllarin\\_tuulivoima/windpower%20web/fr/tour/wres/index.htm](http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/fr/tour/wres/index.htm)  
(Cours complet sur l'énergie éolienne – windpower.org) consulté le 15/08/2020 à 14:15
- [4] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-hydraulique> consulté le 15/08/2020 à 01 :30
- [5] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-la-biomasse> consulté le 15/08/2020 à 10 :30
- [6] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-la-geothermie> consulté le 15/08/2020 à 10 :30
- [7] M. SALEH HAGGAR, A. DJEDDAH, " Détermination du rendement instantané d'un capteur solaire a eau ", " Master Mécanique Energétique ". Université Ibn.Khaldoun de Tiaret ,2017
- [8] Mémoire de Magister ;; Option : Microélectronique –Photovoltaïque ;; Présenté par : Belhadj Mohammed ;; 2007-2008 Centre Universitaire De Bechar Institut des Sciences Exactes
- [9] F. Lasnier, T.G. Ang, " Photovoltaic Engineering Handbook ", IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4
- [10] Mémoire de Magister ;; Option : Microélectronique –Photovoltaïque ;; Présenté par : Belhadj Mohammed ;; 2007-2008 Centre Universitaire De Bechar Institut des Sciences Exactes
- [11] Production d'Electricité au Moyen d'un Système Hybride (Eolien- Photovoltaïque -Diesel) M. Belhamel, S. Moussa et A. Kaabeche Centre de Développement des Energies Renouvelables, BP62 Bouzaréah, CP 16340, Alger Zones Arides (2002) 49-54
- [12] R. Maouedj « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah » mémoire de magister université abou bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2005
- [13] J. G. McGowan, J.F. Manwell, Hybrid/PV/Diesel system experiences, renewable Energy, Vol. 16, pp. 928-933, 1999.
- [14] Ludmil Stoyanov. Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Energie électrique. Université Pascal Paoli, 2011. Français. tel-00653412
- [15] Ionel VECHI, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, Thèse de doctorat, Université du Havre, France, Décembre 2005.
- [16] Présenté par Monsieur Laouar Bachir Engineering EnR, SKTM (filiale de Sonelgaz). Les systèmes hybrides solaires photovoltaïques /conventionnelles avec stockages.

## Références bibliographiques

---

- [17] Ludmil Stoyanov Thèse préparé en cotutelle et soutenu pour l'obtention du grade de Docteur En Eenergétique. Thème : Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Université de Corse pascale Paoli, Université technique de Sofia
- [18] Haizea Gaztanaga arantzamendi, "Etude De Structures D'integration Systeme De Generation Decentralisé : Application Aux Microreseaux," thèse doctorat. Institu National Polytechnique de Grenbole ,Décembre 2006
- [19] Theldja, Merzougui, and Abdlkbir Khedidja. Commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP). Diss. Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2019.
- [20] Boukefous, Houssam Eddine, and Zakaria Abderrezek. Modélisation et commande d'un système de conversion électromécanique (STEP). Diss. Dr. Faradji Djamila, 2019
- [21] Belkehal, S., Bentousni, A., Merzoug, M., et al. Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne. Revue des énergies Renouvelables, 2010, vol. 13, no 1, p. 149-161.
- [22] Mahdaoui, Hamza, and Abdelkader HARROUZ. Simulation et commande vectorielle MLI d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents GSAP. Diss. Université Ahmed Draia-ADRAR, 2017.
- [23] Yahya, A. Ould Mohamed, A. Ould Mahmoud, and I. Youm. "Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV/Eolien/Diesel)." Revue des énergies renouvelables 10.2 (2007): 205-214.
- [24] F.SALAMA « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique». Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011
- [25] I.BENJAMAA « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque» Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid –TLEMCEM, 2012.

# **Annexe**



## Annexe

A :

Grandeurs	Valeurs
Puissance de crête	200 W
Tension de crête	660 V
Courant de pointe	7.52 A
Tension en circuit ouvert	33.2 V
Courant de court-circuit	8.36 A

**Tableau 1** : Paramètres du générateur PV

Grandeurs	Valeurs
État de charge initial	80 %
Type de batterie	Nickel Métal hydride
Tension nominale	200 V
Cote de capacité	75 AH
Temps de réponse de la batterie	20 s

**Tableau 2** : Paramètres de la batterie

Grandeurs	Valeurs
Puissance nominale	1.6e04 VA
Tension composée	400 Vrms
Fréquence	50 Hz
Résistance Statorique	0.0645 Pu
Vitesse nominale	1500 tr/min
Nombre de pôle	2
Moment d'inertie	0.09854 Pu
Coefficient de frottement	0.02005 Pu

**Tableau 3** : Paramètres du générateur diesel

**Résumé :**

Actuellement, Les installations électriques utilisant des énergies renouvelables vont connaître à moyen terme un intérêt certain grâce à leur flexibilité vis-à-vis des sources d'énergie primaires. Néanmoins, la non disponibilité de ces sources d'une façon permanente et leurs faibles rendements représentent les deux majeurs inconvénients de ces sources d'énergies. En conséquence, nous avons envisagé de coupler au sein d'un système hybride- un générateur diesel avec une source d'énergie renouvelable (photovoltaïque) qui représente souvent l'option la plus rentable. Cependant, l'objectif de ce travail est l'étude et simulation d'une centrale de production électrique hybride qui combine entre deux sources d'énergies (photovoltaïque, diesel) avec un système de stockage.

**Mots-clés :** générateur photovoltaïque, générateur diesel, système hybride, système de stockage, énergie électrique.

**Abstract:**

Currently, electrical installations using renewable energies will gain in the medium term a certain interest thanks to their flexibility vis-à-vis primary energy sources. However, the non-availability of these sources on a permanent basis and their low yields represent the two major drawbacks of these energy sources. As a result, we considered coupling in a hybrid system - a diesel generator with a renewable energy source (photovoltaic) which is often the most cost-effective option. However, the objective of this work is the study and simulation of a hybrid power plant that combines two energy sources (photovoltaic, diesel) with a storage system.

**Keywords:** photovoltaic generator, diesel generator, hybrid system, storage system, electric energy.