

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

جامعة ابن خلدون – تيارت

Université Ibn Khaldoun de Tiaret (U.I.K.T)

كلية العلوم التطبيقية

Faculté des Sciences Appliquées

قسم الهندسة الكهربائية

Département de Génie Electrique



## POLYCOPIE DE COURS

### Énergies Renouvelables : Production et stockage

Spécialité : Automatique

Promotion : 3<sup>ème</sup> Année

Semestre : 5

Préparé par :

Pr. BELABBAS Belkacem

Professeur

Expertisé par :

Nom et prénoms

Grade

Université

BOUAZZA ABDELKADER

Pr

Ibn Khaldoun -Tiaret

BERKANI ABDELKADER

MCA

Ibn Khaldoun -Tiaret

## Avant-propos

Ce polycopié a été élaboré dans le but d'accompagner les étudiants de troisième année en Automatique dans l'apprentissage des notions fondamentales liées à l'énergie renouvelable et au stockage d'énergie. Il constitue un support pédagogique destiné à faciliter la compréhension des concepts théoriques tout en mettant en évidence leurs applications pratiques dans les systèmes énergétiques modernes.

Le contenu de ce document s'inscrit dans un contexte marqué par les enjeux énergétiques actuels, notamment la transition vers des sources d'énergie durables, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et le développement de systèmes électriques plus performants et autonomes. Face à ces défis, il apparaît essentiel de former les étudiants aux principes de production, de conversion et de stockage de l'énergie, ainsi qu'à l'intégration de ces technologies dans des systèmes automatisés.

Ce polycopié est organisé de manière progressive, permettant à l'étudiant d'acquérir des bases solides avant d'aborder des notions plus avancées. Chaque chapitre est conçu pour fournir les connaissances nécessaires à la compréhension des systèmes énergétiques, tout en favorisant une approche analytique et critique. Des exemples illustratifs et des synthèses sont proposés afin de renforcer l'assimilation des concepts abordés.

Enfin, ce document n'a pas la prétention d'être exhaustif, mais se veut un outil pédagogique évolutif, pouvant servir de référence pour les cours magistraux, les travaux dirigés et les travaux pratiques. Il constitue également une base de travail pour des études ultérieures dans les domaines de l'énergie, de l'électronique de puissance et des systèmes automatisés.

Introduction générale .....	2
<b>Chapitre I : Introduction à la commande des machines électriques</b>	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition de l'Énergie.....	4
I.3. Déclinaisons de l'Énergie .....	4
I.4. Mesure de l'Énergie.....	5
I.5. Puissance.....	6
I.5.a. Puissance en courant continu .....	7
I.5.b. Puissance en courant alternatif .....	7
I.5.c. Mesure de la puissance .....	8
I.6. Conclusion.....	8
<b>Chapitre II: Les différents types d'énergie et leur transformation</b>	
II.1. Introduction.....	10
II.2. Différents types d'énergie .....	10
II.2.a. Energie de position .....	10
II.2.b. Energie potentielle chimique .....	10
II.2.c. Energie lumineuse .....	11
II.2.d. Energie électromagnétique .....	11
II.2.e. Energie thermique .....	12
II.3. Transformations d'énergie.....	12
II.3.a. Chaleur.....	12
II.3.b. Rayonnement.....	13
II.3.c. Travail électrique et mécanique.....	13
II.4. Conclusion.....	13
<b>Chapitre III: Principales sources de production de l'énergie électrique</b>	
III.1. Introduction.....	15
III.2. Principales sources de production de l'énergie électrique .....	15
III.3. Énergies fossiles.....	15
III.3.a. Le charbon.....	16
III.3.b. Le pétrole .....	17
III.3.c. Le gaz naturel .....	18
III.4. Énergies fissiles.....	18
III.5. Énergies renouvelables .....	19
III.5.a. Définition .....	19

III.5.b. Types des énergies renouvelables .....	19
III.6. Conclusion .....	24
<b>Chapitre IV: Principe de production à partir du solaire, de l'éolien</b>	
IV.1. Introduction .....	26
IV.2. Energie solaire photovoltaïque .....	26
IV.2.a. Définition .....	26
IV.2.b. Modélisation d'une cellule Photovoltaïque .....	26
IV.2.c. Caractéristiques électriques de la cellule Photovoltaïque .....	28
IV.2.d. Générateur photovoltaïque GPV .....	29
IV.2.e. Chaîne de conversion d'énergie PV .....	29
IV.2.f. . Topologies des installations PV .....	30
IV.2.g. Raccordement des GPV .....	35
IV.2.h. Poursuite du point de puissance maximum .....	36
IV.3. Energie éolienne .....	36
IV.3.a. Définition Energie éolienne .....	36
IV.3.b. Principe de conversion d'énergie éolienne .....	37
IV.3.c. . Différents types d'éoliennes .....	37
IV.3.d. Générateurs éoliens .....	39
IV.4. Conclusion .....	42
<b>Chapitre V: Sources d'énergie autonomes avec systèmes de stockage</b>	
V.1. Introduction .....	44
V.2. Systèmes électriques autonomes .....	44
V.3. Définition de système de stockage .....	45
V.4. Les principales applications du stockage d'énergie .....	45
V.5. Les caractéristiques des systèmes de stockage .....	47
V.6. Différents types de stockage d'énergie .....	48
V.6.a. . Batterie électrochimique .....	48
V.6.b. Les condensateurs .....	49
V.6.c. . Les condensateurs .....	50
V.6.d. . Stockage par compression de l'air .....	51
V.6.e. . Les piles à combustible .....	51
V.6.f. . L'hydrogène .....	51
V.7. Conclusion .....	54
Conclusion générale .....	55
Références bibliographiques .....	57

*Chapitre III*

<b>Figure III. 1.</b> Diagramme des énergies fossiles. ....	16
<b>Figure III. 2.</b> Centrale thermique au charbon. ....	17
<b>Figure III. 3.</b> Diagramme des énergies renouvelables. ....	19
<b>Figure III. 4.</b> Energie de la biomasse. ....	20
<b>Figure III. 5.</b> Energie géothermique. ....	21
<b>Figure III. 6.</b> Energie hydraulique. ....	21
<b>Figure III. 7.</b> Energie éolienne. ....	22
<b>Figure III. 8.</b> Energie solaire. ....	23
<b>Figure III. 9.</b> Schéma équivalent du fonctionnement de la cellule photovoltaïque. ....	23

*Chapitre IV*

<b>Figure IV. 1.</b> Modèle d'une cellule PV. ....	26
<b>Figure IV. 2.</b> Caractéristique courant-tension d'une cellule PV. ....	28
<b>Figure IV.3.</b> Schéma bloc d'un système de conversion photovoltaïque. ....	29
<b>Figure IV. 4.</b> Configuration d'un onduleur centralisée. ....	30
<b>Figure IV. 5.</b> Configuration d'un onduleur rangé. ....	31
<b>Figure IV. 6.</b> Panneaux photovoltaïques dans une configuration à plusieurs rangées. ...	32
<b>Figure IV. 7.</b> Configuration du module CA. ....	33
<b>Figure IV. 8.</b> Schéma de principe de la topologie d'un hacheur modulaire parallèle. ....	34
<b>Figure IV. 9.</b> Schéma de principe de la topologie d'un hacheur modulaire série. ....	34
<b>Figure IV. 10.</b> Exemple de système photovoltaïque connecté au réseau de distribution. ....	35
<b>Figure IV. 11.</b> Exemple d'un système PV/ stockage connecté au réseau autonome. ....	36
<b>Figure IV. 12.</b> Principe de conversion d'énergie éolienne. ....	37
<b>Figure IV. 13.</b> Éolienne à axe vertical. ....	38
<b>Figure IV. 14.</b> Éolienne à axe horizontal. ....	38
<b>Figure IV. 15.</b> Éolienne à vitesse constante. ....	39
<b>Figure IV. 16.</b> Éoliennes à vitesse variable commandées par le stator. ....	41
<b>Figure IV. 17.</b> Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA. ....	42

*Chapitre V*

**Tableau V. 1.** Comparatif des caractéristiques des systèmes de stockage de l'énergie. . 47  
**Tableau V. 2.** Principales technologies de stockage d'énergie. .... 53

# **Introduction Générale**

L'énergie occupe une place centrale dans le développement des sociétés modernes et constitue un élément fondamental de nombreux systèmes physiques, industriels et technologiques. La production, la conversion, la distribution et l'utilisation de l'énergie, en particulier sous forme électrique, sont au cœur des enjeux économiques, environnementaux et technologiques actuels. La maîtrise de ces concepts est donc essentielle pour les étudiants et futurs ingénieurs appelés à concevoir, exploiter et optimiser des systèmes énergétiques performants et durables.

Ce support de cours intitulé « Énergie renouvelable et stockage d'énergie » s'adresse aux étudiants de troisième année en Automatique. Il est structuré en cinq chapitres, visant à fournir une compréhension progressive des concepts fondamentaux et des applications liées aux systèmes énergétiques modernes. Il a pour objectif d'établir un lien cohérent entre les bases théoriques et les applications pratiques, tout en tenant compte des contraintes techniques, économiques et environnementales.

Le document est organisé de manière progressive. Le premier chapitre présente les notions fondamentales de l'énergie et de la puissance, ainsi que leurs méthodes de mesure en courant continu et en courant alternatif. Le deuxième chapitre est consacré aux différentes formes d'énergie et aux mécanismes de conversion entre celles-ci. Le troisième chapitre aborde les principales sources de production de l'énergie électrique, en distinguant les sources fossiles et les sources renouvelables. Le quatrième chapitre se focalise sur deux sources majeures d'énergie renouvelable, à savoir le photovoltaïque et l'éolien, en détaillant leurs principes de fonctionnement et leurs composants. Enfin, le cinquième chapitre traite des sources d'énergie autonomes et des systèmes de stockage, éléments indispensables pour assurer la continuité et la fiabilité de l'alimentation électrique, notamment dans les applications utilisant des ressources renouvelables.

À travers ce polycopié, l'étudiant est amené à acquérir les connaissances nécessaires pour comprendre les enjeux énergétiques actuels, analyser le fonctionnement des systèmes énergétiques et appréhender les solutions technologiques mises en œuvre pour répondre aux besoins croissants en énergie tout en respectant les contraintes environnementales.

# Chapitre I

## Chapitre I. Généralité sur l'énergie

### I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons d'abord exploré la définition de l'énergie, en soulignant son rôle fondamental dans les systèmes physiques. Nous avons ensuite abordé la manière de mesurer l'énergie. Par la suite, nous nous sommes penchés sur la notion de puissance, tant en courant continu qu'en courant alternatif. Enfin, nous avons examiné les outils de mesure de la puissance.

### I.2. Définition de l'Energie

Le mot Energie, vient du mot Grec ENERGIA qui signifie force en action.

L'énergie est ce qui permet d'agir : sans elle, rien ne se passe, pas de mouvement, pas de lumière, pas de vie.

Au sens physique, l'énergie caractérise la capacité à modifier un état, à produire un travail entraînant du mouvement, de la lumière, ou de la chaleur.

L'énergie est la grandeur qui permet de caractériser toute action ou un changement d'état dans un système :

- Changement de la température (énergie thermique).
- Changement de la vitesse (énergie cinétique).
- Changement de la composition chimique (énergie chimique, combustion).
- Changement de la composition atomique (énergie nucléaire).

### I.3. Déclinaisons de l'Energie

Les énergies que nous utilisons au quotidien, à la maison ou pour le transport, ne sont pas disponibles dans la nature sous forme prête à l'emploi. L'énergie que nous qualifions de primaire, celle qui est disponible dans la nature, doit être transformée, convertie sous une autre forme pour être utilisable par le consommateur comme :

- Le pétrole est raffiné avant d'arriver dans le réservoir de la voiture ;
- L'électricité a été produite dans une centrale électrique à partir de la conversion d'une source d'énergie primaire.

On appelle énergie finale l'énergie obtenue à partir de sources d'énergie primaires, celle qui peut être utilisée par le consommateur final.

Du fait des pertes aux différentes étapes de transformation, de stockage, de transport, l'énergie primaire est toujours supérieure à l'énergie finale dans les bilans.

#### I.4. Mesure de l'Énergie

L'unité de mesure de l'énergie est le joule ( $J$ ). Celui-ci s'inscrit dans un système globale appelé Système International ( $SI$ ) d'unités.

Le joule est la quantité d'énergie nécessaire pour élever une masse de **1 kg** à **1 m** de hauteur.

L'énergie électrique est égale au produit de la puissance ( $P$ ) par la durée ( $t$ ) de son fonctionnement.

$$E = P \times t \quad (I.1)$$

Avec :  $P$  en  $W$  et  $t$  en **sec** donc l'énergie  $E$  en **Joule**.

A l'entrée de chaque réseau électrique domestique ou industriel, on trouve un compteur d'énergie électrique installé.

Le rôle de cet appareil est la mesure de l'énergie électrique consommée par le réseau en **KWh**.

Avec:

- $1 Wh = 3600 J = 3.6 \times 10^3 J$
- $1 KWh = 3600 \times 10^3 J = 3.6 \times 10^6 J$

Il est aussi utilisé au travers de ses multiples en milliers :

- Kilojoule ( $KJ$ ):  $1 KJ = 10^3 J$ .
- Mégajoule ( $MJ$ ):  $1 MJ = 10^6 J$ .
- Gigajoule ( $GJ$ ):  $1 GJ = 10^9 J$ .

**Exemples d'application****Exemple N°01**

Les lampes des phares d'un automobile ont une puissance de 45 W chacune. Calculer l'énergie consommée par les deux lampes pendant une durée de fonctionnement de trois heures. Exprimer ce résultat en *KWh* puis en Joules.

**Exemple N°02**

Un fer à repasser porte les indications suivantes : 230 V et 1000 W.

1. Calculer l'énergie qu'il consomme en 2 h 30 min en *KWh* puis en Joules.
2. Calculer l'intensité de courant I qui le traverse.
3. Calculer le coût de l'heure sachant que la Sonalgaz facture 50 dinars (DA) le *KWh*.

**Solution des exemples d'application****Exemple N°01**

$$E [KWh] = P \times t = (2 \times 45) \times 3 = 270 Wh = 0.27 KWh$$

$$E [J] = E [KWh] \times 3.6 \times 10^6 = 0.27 \times 3.6 \times 10^6 = 0.972 MJ$$

**Exemple N°02**

$$V = 230 V; P = 1000 W.$$

1.  $E [KWh] = P \times t = 1000 \times 2.5 = 2500 Wh = 2.5 KWh$   
 $E [J] = E [KWh] \times 3.6 \times 10^6 = 2.5 \times 3.6 \times 10^6 = 9 MJ$
2. Calculer l'intensité de courant I qui le traverse.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1000}{230} = 4.34A$$

3. Calculer le coût de l'heure sachant que la Sonalgaz facture 50 dinars (DA) le *KWh*.  
 $Cost = E \times (50) = 2.5 \times (50) = 125 DA$

**I.5. Puissance**

La puissance électrique est fournie par le générateur et elle est consommée par le récepteur.

La puissance n'est pas synonyme d'énergie. Lors des échanges d'énergies, on mesure la quantité d'énergie transférée ou transformée ainsi que la durée du processus.

Dans le SI, la puissance s'exprime en Watt ( $W$ ). On utilise également le cheval-vapeur ( $ch$ ) :

$$1 \text{ ch} = 735 \text{ W}$$

### I.5.a. Puissance en courant continu

La puissance  $P$  consommée par une charge en courant continu est égale au produit de la tension  $U$  à ses bornes par l'intensité  $I$  du courant qui le traverse.

$$P = U \times I \quad (\text{I.2})$$

Avec :

$P$ : en Watt ( $W$ );  $U$ : en volt  $V$ ;  $I$ : en ampère  $A$ .

### I.5.b. Puissance en courant alternatif

Le courant alternatif est représenté par une sinusoïde. La fréquence est de 50Hz ou (60Hz aux Etats-Unis). Cela veut dire, qu'il y a 50 oscillations en 1 secondes.

La notion de déphasage ( $\varphi$ ) entre la tension et l'intensité est particulièrement spécialisé dans le courant alternatif. A noter que selon le type de la charge (résistif, inductif, capacitif), les déphasages sont différents.

Il y a donc trois puissances différentes, à savoir la puissance active ( $P$ ), réactive ( $Q$ ) et apparente ( $S$ ).

#### I.5.b.1. Puissance active

La puissance active est la puissance qui va provoquer un mouvement, on pourrait la qualifier de puissance utile. Elle représente la majorité de l'énergie consommée.

$$P = U \times I \times \cos(\varphi) \quad (\text{I.3})$$

#### I.5.b.2. Puissance réactive

La puissance réactive est essentielle dans de nombreux systèmes, en particulier ceux dotés de bobinages. On la retrouve notamment dans les moteurs tournants, qui génèrent un champ tournant, ainsi que dans les convertisseurs statiques utilisant des interrupteurs comme les diodes, thyristors et transistors. Cette puissance réactive peut être compensée par des batteries de condensateurs, capables de fournir l'énergie réactive nécessaire au système.

$$Q = U \times I \times \sin(\varphi) \quad (\text{I.4})$$

Avec :  $Q$ : en Volt-Ampère Réactif (**Var**)

### ***I.5.b.3. Puissance apparante***

La puissance apparente est la somme de la puissance active et réactive. Son unité est le (VA).

Elle se calcule comme suit :

$$S = U \times I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{I.5})$$

### **I.5.c.Mesure de la puissance**

En courant continu, la puissance se calcule à partir de la tension mesurée avec un voltmètre et de l'intensité relevée avec un ampèremètre.

En courant alternatif, il est nécessaire d'utiliser un wattmètre pour effectuer cette mesure.

### **I.6. Conclusion**

Ce chapitre a mis en lumière l'importance décisive de l'énergie et de la puissance dans les systèmes électriques. Nous avons vu comment la définition et la mesure de l'énergie sont fondamentales pour comprendre les processus énergétiques. La distinction entre courant continu et courant alternatif pour la mesure de la puissance.

En intégrant ces concepts, nous sommes mieux équipés pour aborder les défis énergétiques actuels et pour optimiser l'utilisation de l'énergie dans divers domaines.

# Chapitre II

## Chapitre II. Les différents types d'énergie et leur transformation

### II.1.Introduction

L'énergie est une grandeur fondamentale dans l'étude des systèmes physiques. Elle existe sous diverses formes, chacune ayant des caractéristiques spécifiques et jouant un rôle déterminant dans les phénomènes naturels et les technologies modernes. Ce chapitre explore les différents types d'énergie et la manière dont elles peuvent être converties d'une forme à une autre.

### II.2.Différents types d'énergie

L'énergie exprime la force des phénomènes physiques, c'est une quantité mesurable. On distingue différentes formes d'énergie :

- Energie de position.
- Energie potentielle chimique.
- Energie lumineuse.
- Energie électromagnétique.
- Energie thermique.

#### II.2.a. Energie de position

Un corps possède une énergie de position, connue sous le nom d'énergie potentielle. Cette énergie est stockée dans le corps ou le système et peut se transformer en énergie cinétique lorsque le corps est mis en mouvement.

#### II.2.b. Energie potentielle chimique

Lors d'une réaction chimique, de l'énergie peut être libérée ou absorbée, se manifestant sous forme de chaleur, de lumière, d'agitation ou d'explosion.

Cette transformation implique la recombinaison des atomes, entraînant un changement de nature chimique de la matière.

La combustion, par exemple, permet de libérer l'énergie potentielle chimique stockée dans un combustible comme le charbon ou le bois, en la convertissant en chaleur (énergie thermique).

### II.2.c. Energie lumineuse

La lumière est une onde qui se déplace à la vitesse de la lumière, transportant de l'énergie d'une source lumineuse comme une étoile, une lampe ou une flamme vers un récepteur tel que l'œil, une plante ou un panneau solaire.

Un capteur solaire agit comme un récepteur, capable de capturer l'énergie lumineuse et de la convertir en électricité. À l'inverse, une source de lumière, comme une lampe, transforme l'énergie qu'elle reçoit sous forme d'électricité en énergie lumineuse, émise sous forme de particules appelées photons.

### II.2.d. Energie électromagnétique

L'énergie électromagnétique est liée aux ondes électromagnétiques, comme les ondes radio ou de rayonnement.

Chaque onde se caractérise par sa fréquence (nombre d'oscillations par seconde) et sa longueur d'onde (distance parcourue durant une oscillation). Elle se propage dans le vide à la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s) et presque aussi rapidement dans l'air.

Selon la longueur d'onde et la fréquence, on peut obtenir différentes formes :

- Ondes radio
- Micro-ondes (utilisées pour réchauffer des aliments)
- Infra-rouges (qui permettent de voir à travers certains matériaux)
- Lumière visible (détectable par l'œil humain)
- Ultra-violets (causant des coups de soleil)
- Rayons X (pour les examens médicaux)
- Rayons gamma (produits par des processus nucléaires)

Cette énergie est émise par une source et peut être captée par des capteurs, étant largement utilisée pour transmettre des informations.

### **II.2.e. Energie thermique**

Cette forme d'énergie est associée à la température du système, reflétant l'agitation microscopique des particules. Le système peut transférer de la chaleur à un corps plus froid, comme dans le cas de l'eau géothermale.

## **II.3. Transformations d'énergie**

L'énergie est une grandeur mesurable qui représente le potentiel d'un système à réaliser un travail et à produire un effet. Comme mentionné précédemment, elle se présente sous différentes formes et peut se transformer d'une forme à une autre, entraînant des phénomènes tels que le mouvement, la déformation, le changement de structure, l'augmentation de la température ou les réactions chimiques. Il existe trois modes de transfert d'énergie d'un système à un autre :

### **II.3.a. Chaleur**

La température d'un système peut être augmentée pour provoquer un changement d'état. Lorsque deux systèmes présentent des températures différentes, un flux d'énergie, appelé chaleur, se déplace du système le plus chaud vers le plus froid, jusqu'à atteindre un équilibre thermique.

Le transfert de chaleur s'effectue par différents modes :

- Conduction : principalement dans les métaux.
- Convection : via le mouvement interne d'un fluide, causé par des variations de température.
- Rayonnement : par émission de radiation.

### **II.3.b. Rayonnement**

Ce mode de transfert se produit par la présence d'ondes électromagnétiques. Tous les rayonnements nécessitent de l'énergie pour être émis et transportent cette énergie sous forme d'énergie rayonnante, permettant ainsi un transfert d'énergie entre le corps émetteur (la source) et le corps qui les absorbe (le récepteur).

### **II.3.c. Travail électrique et mécanique**

Une force peut agir en modifiant la position, la forme ou en provoquant un mouvement (force motrice). Le travail, qu'il soit mécanique ou électrique, permet d'apporter ou de prendre de l'énergie d'un système.

### **II.4. Conclusion**

La diversité des formes d'énergie et leur capacité à se transformer sont au cœur des mécanismes physiques et des systèmes technologiques qui nous entourent. Ces processus jouent un rôle fondamental dans notre quotidien et dans l'industrie. Comprendre ces transformations permet non seulement de mieux comprendre les phénomènes naturels, mais aussi de développer des solutions énergétiques plus efficaces et durables pour répondre aux besoins croissants de la société.

# Chapitre III

## Chapitre III. Principales sources de production de l'énergie électrique

### III.1. Introduction

Ce chapitre explore les principales sources de production d'énergie électrique, en mettant l'accent sur les différentes technologies et ressources utilisées pour répondre aux besoins croissants en électricité. Les sources d'énergie peuvent être classées en deux grandes catégories : les sources fossiles et les sources renouvelables.

### III.2. Principales sources de production de l'énergie électrique

Les principales sources de production d'énergie électrique se répartissent en trois catégories:

- Les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) ;
- Les énergies fissiles (nucléaire) ;
- Les énergies renouvelables (solaire, éolien, biomasse, hydraulique, géothermie et énergies marines).

### III.3. Énergies fossiles

Suivant la figure III.1, les énergies fossiles comprennent trois ressources principales :

- Le charbon ;
- Le pétrole ;
- Le gaz naturel.

Ces combustibles résultent de la décomposition de végétaux et d'organismes vivants enfouis sous la terre, et sont principalement constitués de molécules contenant du carbone.

Leur utilisation entraîne une diminution de ces ressources, qui nécessitent des millions d'années pour se former, ce qui les classe parmi les sources d'énergie non renouvelables.

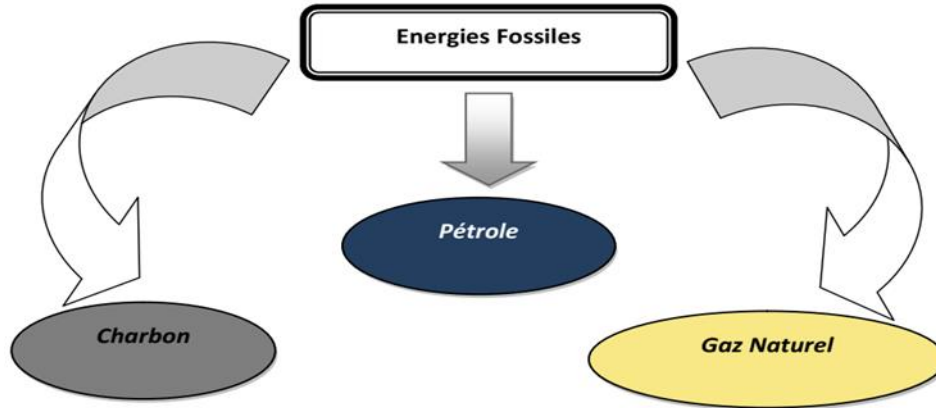


Figure III. 1. Diagramme des énergies fossiles.

### III.3.a. Le charbon

Le charbon est un combustible qui constitue 80 % des réserves d'énergies fossiles disponibles. C'est l'énergie fossile la plus abondante et la mieux répartie. Lorsqu'il a été découvert, l'homme l'a principalement utilisé pour chauffer les maisons, faire fonctionner les machines des usines et alimenter les trains.

La centrale thermique au charbon, illustrée dans la Figure III.2, est la plus courante au monde, notamment dans les pays disposant de grandes réserves de charbon, tels que la Chine, les États-Unis et l'Allemagne. Cependant, un des principaux inconvénients de ce type de centrale est que la combustion du charbon génère d'importantes émissions de gaz à effet de serre. Pour être utilisé, le charbon est d'abord broyé en fines particules, puis mélangé à de l'air chaud avant d'être injecté sous pression dans le brûleur de la chaudière.

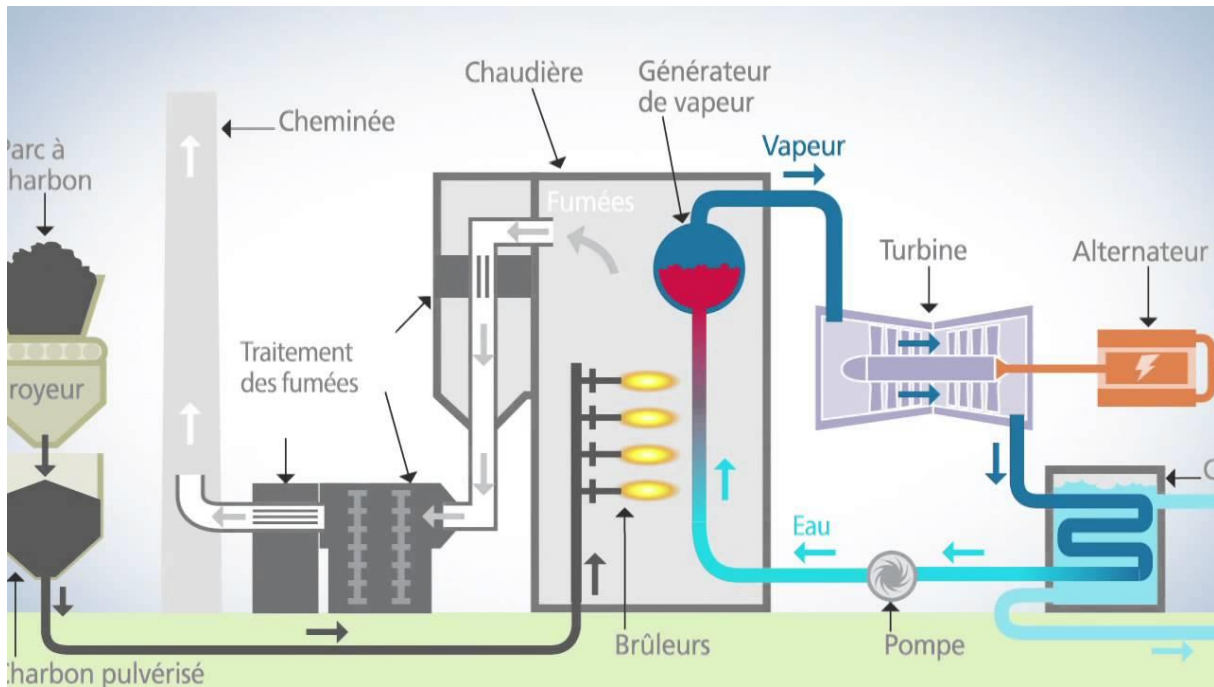


Figure III. 2. Centrale thermique au charbon.

### III.3.b. Le pétrole

Le pétrole tire son nom du latin "Petra", signifiant pierre, et "oléum", qui signifie huile.

Il s'agit d'une huile minérale naturelle très foncée et plus dense que l'eau douce. Le pétrole brut est un mélange complexe de milliers d'hydrocarbures, ainsi que de résidus d'eau et de solides.

Le processus de raffinage inclut :

- L'extraction de l'eau et des solides présents dans le pétrole brut ;
- La séparation et le traitement des hydrocarbures.

Le pétrole est utilisé dans de nombreux secteurs énergétiques, mais sa domination est particulièrement marquée dans le domaine des transports, où il fournit presque l'intégralité des carburants liquides, également utilisés comme combustibles dans les centrales classiques.

### III.3.c. Le gaz naturel

Il y a des millions d'années, des organismes vivants microscopiques ont été enfouis sous le sol et se sont transformés en gaz naturel en raison de la chaleur intense, de la forte pression et de l'absence d'air.

Au niveau domestique, le gaz naturel est utilisé pour le chauffage, la cuisson des aliments et même comme carburant pour les véhicules.

Principalement composé de méthane, le gaz naturel est l'énergie fossile la plus efficace du marché, et il est également exploité dans l'industrie pour produire chaleur et électricité.

Les centrales thermiques utilisent le gaz comme combustible pour générer la chaleur qui alimente la turbine à vapeur. Elles présentent l'avantage d'émettre moins de gaz à effet de serre, ce qui les rend plus écologiques.

Le fonctionnement de ce type de centrale est similaire à celui des centrales thermiques au charbon, la principale différence résidant dans la taille de la chaudière, qui est adaptée au combustible gazeux. Au cours des vingt dernières années, les centrales à gaz ont progressivement été remplacées par des centrales équipées de turbines à combustion.

### III.4. Énergies fissiles

Une centrale nucléaire génère de l'électricité à partir de la chaleur, et elle est classée comme une centrale thermique, tout comme les centrales à charbon ou à gaz. Cependant, la production de chaleur dans une centrale nucléaire ne produit ni polluants ni gaz à effet de serre.

L'électricité est produite par la fission des noyaux d'uranium ou de plutonium, qui libère des neutrons (deux ou trois par fission) et crée de nouveaux atomes. Cette réaction en chaîne génère d'importantes quantités de chaleur, qui sont utilisées pour chauffer de l'eau et la transformer en vapeur. La vapeur fait ensuite tourner une turbine couplée à un alternateur, qui produit de l'électricité.

Après être passée par la turbine, la vapeur est refroidie et se condense en eau, puis est renvoyée dans le générateur de vapeur, complétant ainsi le cycle.

### III.5. Énergies renouvelables

#### III.5.a. Définition

Les énergies sont considérées comme renouvelables lorsque leur capacité de régénération est rapide. En général, une énergie renouvelable désigne une méthode de production d'énergie utilisant des ressources dont les réserves sont inépuisables.

#### III.5.b. Types des énergies renouvelables

On distingue plusieurs types d'énergies renouvelables illustré dans la Figure III.3, que l'on peut classer en cinq grandes familles :

- Energie biomasse ;
- Energie géothermique ;
- Energie hydraulique ;
- Energie éolienne ;
- Energie solaire.

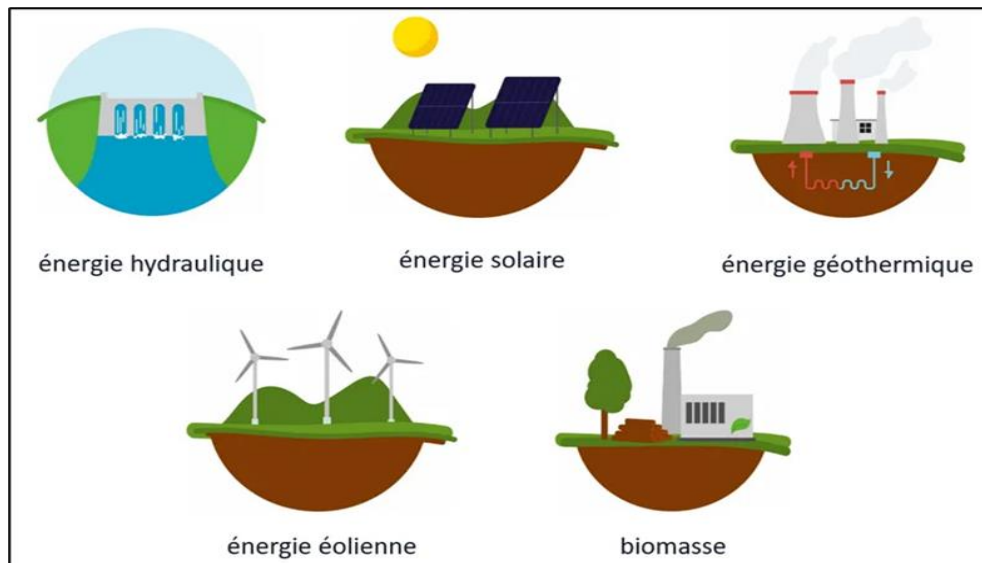


Figure III. 3. Diagramme des énergies renouvelables.

### III.5.b.1. Energie biomasse

La biomasse est classée comme une énergie renouvelable en raison du processus de photosynthèse. Elle désigne l'ensemble des matières organiques, principalement d'origine végétale, pouvant être brûlées ou transformées chimiquement pour produire de l'énergie. Par exemple, le méthane, qui peut se former à partir de matières organiques en l'absence d'oxygène, constitue un excellent combustible.

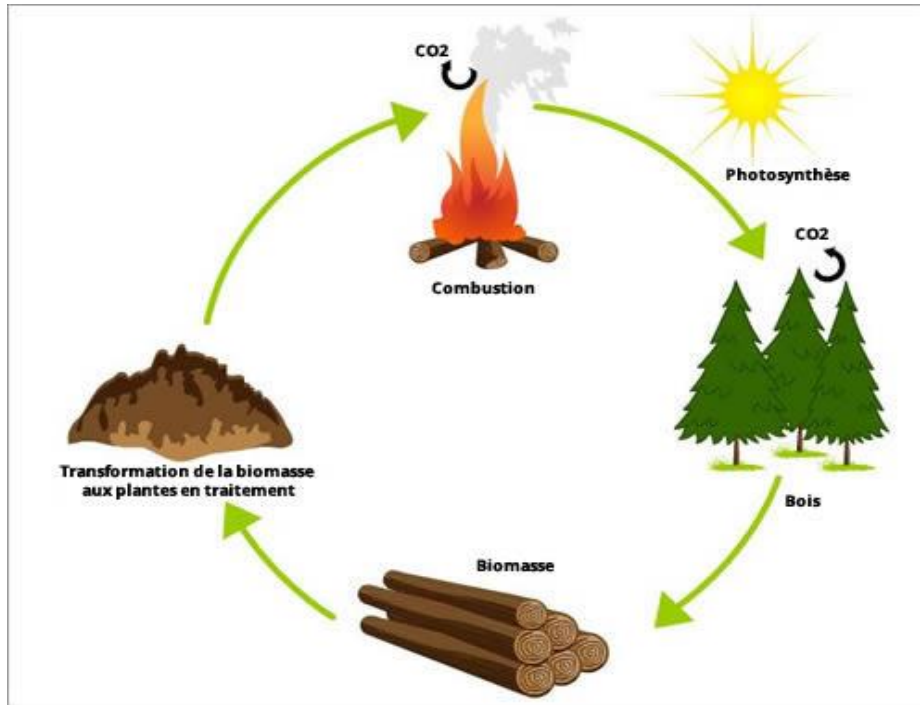


Figure III. 4. Energie de la biomasse.

### III.5.b.2. Energie géothermique

Le principe de la géothermie repose sur l'extraction de l'énergie présente dans le sous-sol terrestre, sous forme d'eaux et de vapeur d'eau très chaudes. L'eau provenant des couches profondes est pompée et transmet sa chaleur (variant entre 30 et 150 °C) à des centrales dédiées, permettant ainsi la production d'électricité, comme illustré dans la Figure III.5. Cette énergie peut être utilisée pour des installations collectives, des logements ou des exploitations agricoles.

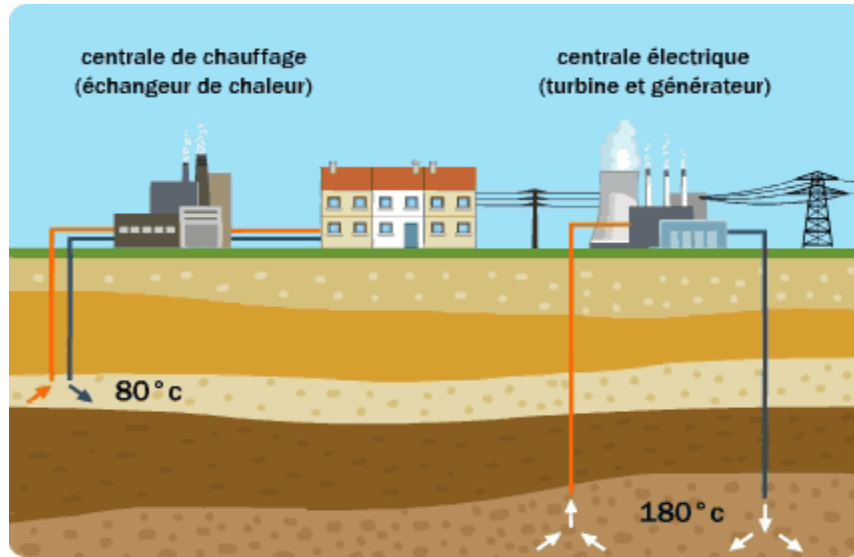


Figure III. 5. Energie géothermique.

### III.5.b.3. Energie hydraulique

Une centrale hydraulique illustrée dans la Figure III.6 exploite l'énergie d'une masse d'eau en mouvement pour générer de l'électricité. Un barrage crée un Lac de retenue contenant une grande quantité d'eau. Pour produire de l'électricité, les vannes du barrage sont ouvertes, permettant à l'eau de s'écouler dans une conduite traversant le barrage, où sa vitesse augmente. À la sortie de cette conduite, l'eau fait tourner une turbine, laquelle entraîne un alternateur pour produire de l'électricité. L'eau est ensuite relâchée et reprend son cours normal dans la rivière.

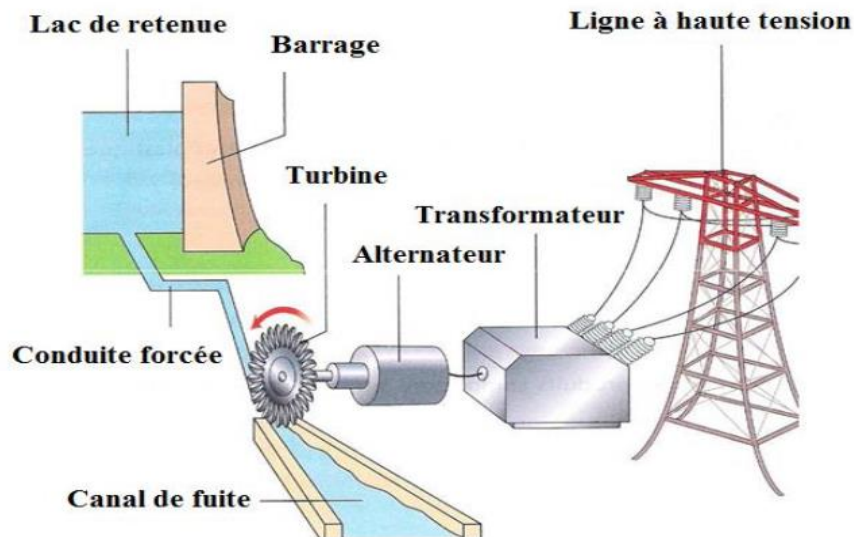


Figure III. 6. Energie hydraulique.

### III.5.b.4. Energie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable et inépuisable qui génère de l'électricité en exploitant la force du vent. Les parcs éoliens peuvent être installés sur terre (parcs terrestres) ou en mer, à plusieurs kilomètres des côtes.

L'aérogénérateur, ou éolienne, est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique grâce à sa turbine, puis en énergie électrique via une génératrice, cette énergie étant ensuite transmise au réseau électrique, comme illustré dans la Figure III.7. Cependant, le vent étant une ressource imprévisible, il est difficile d'assurer une transmission d'énergie constante.

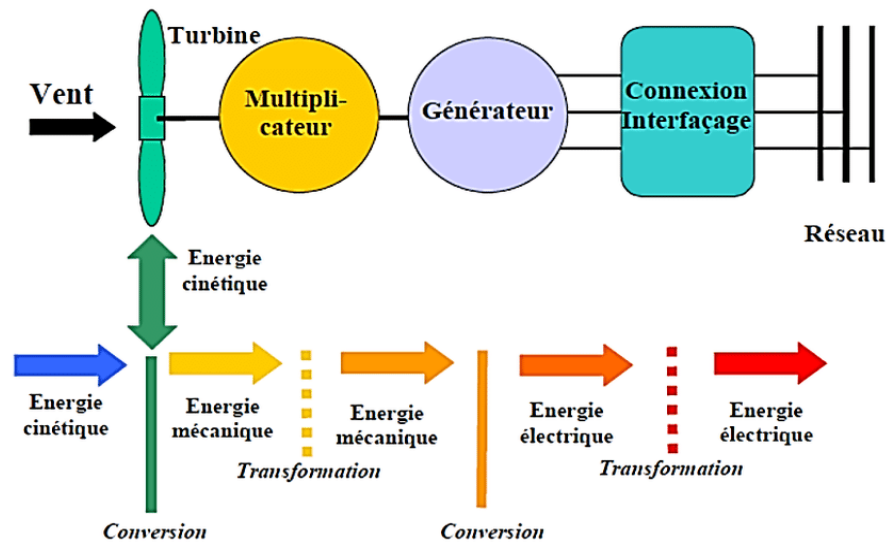


Figure III. 7. Energie éolienne.

### III.5.b.5. Energie solaire

Chaque jour, le Soleil nous envoie une quantité immense d'énergie, que l'on peut capter sous forme de chaleur ou convertir en électricité illustrée dans la Figure III.8. Le rayonnement solaire capté par la surface terrestre se divise en rayonnement direct, qui nous parvient en ligne droite par temps clair, et en rayonnement diffus, qui est dispersé ou réfléchi par des composants de l'atmosphère.

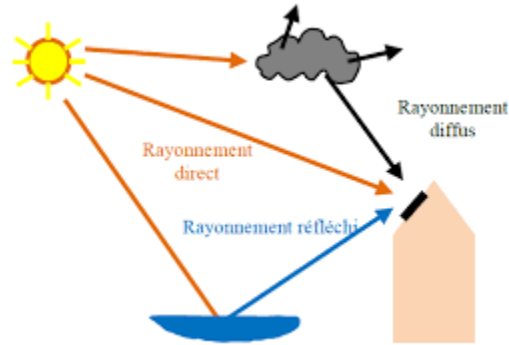


Figure III. 8. Energie solaire.

L'énergie photovoltaïque consiste à transformer la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques.

Une cellule photovoltaïque typique en silicium présentée dans la Figure III.9, est constituée d'une fine plaquette composée d'une couche de silicium dopé au phosphore (type N) sur une couche plus épaisse de silicium dopé au bore (type P). Un champ électrique se forme près de la surface supérieure de la cellule à la jonction des deux couches (jonction P-N). Lorsque la lumière solaire atteint la surface du semi-conducteur, les électrons sont attirés vers la couche de silicium de type N, ce qui entraîne un excès de charges négatives dans celle-ci et un excès de charges positives dans la couche de type P. Ce déséquilibre de charges, provoqué par le champ électrique présent à la jonction, génère un courant électrique.

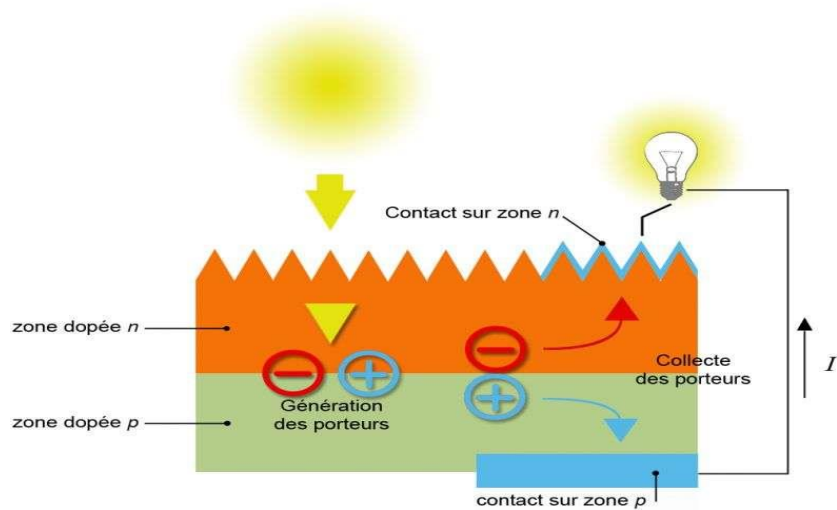


Figure III. 9. Schéma équivalent du fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

### III.6. Conclusion

Les principales sources de production d'énergie électrique jouent chacune un rôle distinct dans le mix énergétique mondial. Les énergies fossiles, bien que dominantes, soulèvent des préoccupations environnementales et sont de plus en plus remplacées par des solutions renouvelables. Les énergies renouvelables, quant à elles, représentent un avenir prometteur, mais nécessitent des avancées technologiques et des investissements pour compenser leur intermittence et optimiser leur intégration dans les réseaux électriques. La transition vers un système énergétique durable dépendra d'un équilibre entre l'exploitation des ressources actuelles et le développement d'énergies plus propres et renouvelables.

# Chapitre IV

## Chapitre IV. Principe de production à partir du solaire, de l'éolien

### IV.1. Introduction

Ce chapitre présente deux sources majeures d'énergie renouvelable : le photovoltaïque et l'éolien. Nous y détaillons les différentes composantes de chaque système ainsi que leurs principes de fonctionnement respectifs. Le photovoltaïque, exploitant l'énergie solaire, et l'éolien, utilisant la force du vent, constituent des alternatives propres et durables aux énergies fossiles.

### IV.2. Energie solaire photovoltaïque

#### IV.2.a. Définition

Le nom Photovoltaïque vient du nom Grec, il est composé de deux parties : « photo » signifiant Lumière, et « Volta » de nom du physicien italien Alessandro Volta.

Le phénomène de la conversion de l'énergie Photovoltaïque (PV) en énergie électrique dans une cellule photovoltaïque a été découverte par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel au 19<sup>ème</sup> siècle.

#### IV.2.b. Modélisation d'une cellule Photovoltaïque

L'énergie électrique générée par une cellule PV change en fonction des conditions de météorologiques tels que les niveaux d'éclairement solaire et la température ambiante.

Une cellule solaire peut être représentée comme un modèle de source de courant comme indiquée sur la Figure IV.1.

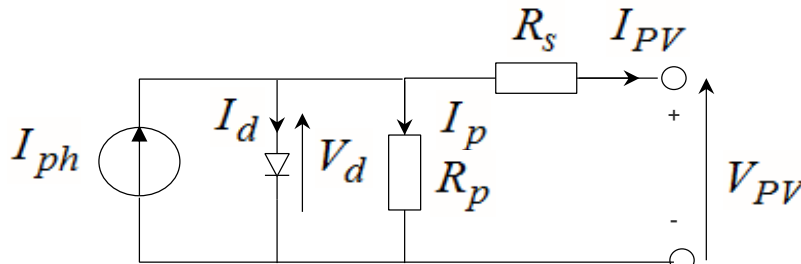


Figure IV. 1. Modele d'une cellule PV.

Où  $I_{ph}$  est le courant généré par la photopile ;  $I_d$  est le courant de la diode ;  $I_p$  est le courant circulant dans la résistance parallèle  $R_p$  ;  $I_{PV}$  est le courant net de la cellule PV ;  $V_{PV}$  est la tension de la cellule PV ;  $V_d$  est la tension de la diode ;  $R_p$  and  $R_s$  sont respectivement les résistances en parallèle et en série de la cellule PV.

En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant  $I_{PV}$  de la cellule est :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (IV.1)$$

$$I_p = \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{R_p} \quad (IV.2)$$

Le courant  $I_d$  est donné par :

$$I_d = I_0 \left[ e^{\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{\alpha V_t}} - 1 \right] \quad (IV.3)$$

L'équation reliant le courant et la tension dans le circuit s'écrit :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{\alpha V_t}} - 1 \right] - \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{R_p} \quad (IV.4)$$

$$V_t = \frac{N_s K T}{q} \quad (IV.5)$$

Où  $I_0$  est le courant de saturation de diode,  $a$  est le facteur d'idéalité de diode ;  $V_t$  est la tension thermique ;  $N_s$  représente le nombre de cellules connectées en série ;  $K$  indique la constante de Boltzmann ;  $T$  est la température réelle et  $q$  est la charge de l'électron.

Le courant généré par une cellule PV est difficile à déterminer car il est influencé par les deux résistances. Les fiches techniques ne fournissent que le courant de court-circuit nominal ( $I_{sc,n}$ ), qui est le courant maximal pouvant être généré par la cellule PV.

Une hypothèse couramment utilisée dans les modèles PV est  $I_{sc} \approx I_{PV}$  car dans les dispositifs pratiques  $R_p$  est élevée et  $R_s$  est faible. Avec cette hypothèse, le courant généré par la cellule est exprimé comme suit:

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_I \Delta_T) \frac{G}{G_n} \quad (IV.6)$$

Lorsque  $I_{sc}$  est un courant de court-circuit,  $\Delta_T = T - T_n$  ( $T_n$  est la température nominale),  $G$  and  $G_n$  sont respectivement l'irradiation et l'irradiation nominale.

Le courant  $I_0$  est exprimé comme:

$$I_0 = \frac{(I_{sc} + K_I \Delta_T)}{\left(\frac{I_{oc,n} + K_V \Delta_T}{\alpha V_t}\right)} \quad (IV.7)$$

Lorsque  $V_{oc,n}$  [V] est la tension nominale en circuit ouvert.  $K_V$  et  $K_I$  sont les coefficients de tension et de courant.

#### IV.2.c. Caractéristiques électriques de la cellule Photovoltaïque

A la base de l'équation (IV.4), on peut tracer la caractéristique courant-tension de la cellule PV présenté dans la Figure IV.2.

Sous un éclairage donné, toute cellule PV est caractérisée par une courbe courant-tension ( $I - V$ ) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule.

Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

- Sa tension à vide : ( $V_{co}$ ). Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant de court-circuit : ( $I_{cc}$ ). Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimal : ( $V_{pm}$ ), ( $I_{pm}$ ).

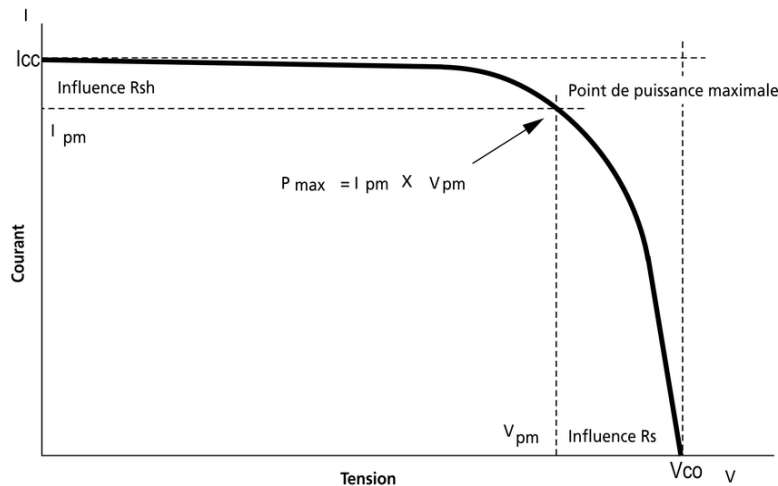


Figure IV. 2. Caractéristique courant-tension d'une cellule PV.

#### IV.2.d. Générateur photovoltaïque GPV

La puissance produite dépend des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque et des données météorologiques (éclairage solaire, température).

Pour avoir une puissance désirée, les cellules photovoltaïques doivent se regrouper en modules et l'association de plusieurs modules en parallèle ou en série entre eux forment un panneau PV pour arriver à la puissance désirée.

#### IV.2.e. Chaîne de conversion d'énergie PV

Un Générateur Photovoltaïque (GPV) est une source de Courant Continu (CC) et par conséquent sa sortie doit être adaptée pour sa connexion à un réseau alternatif ou pour alimenter une charge à Courant Alternatif (CA).

Le GPV est relié à un convertisseur CC / CC contrôlé pour le but d'extraire le point de production de puissance maximale. Puis, il est connecté au réseau électrique à travers un convertisseur CC / CA.

Le schéma général de la chaîne de conversion photovoltaïque peut se décomposer comme le montre la Figure IV.3.

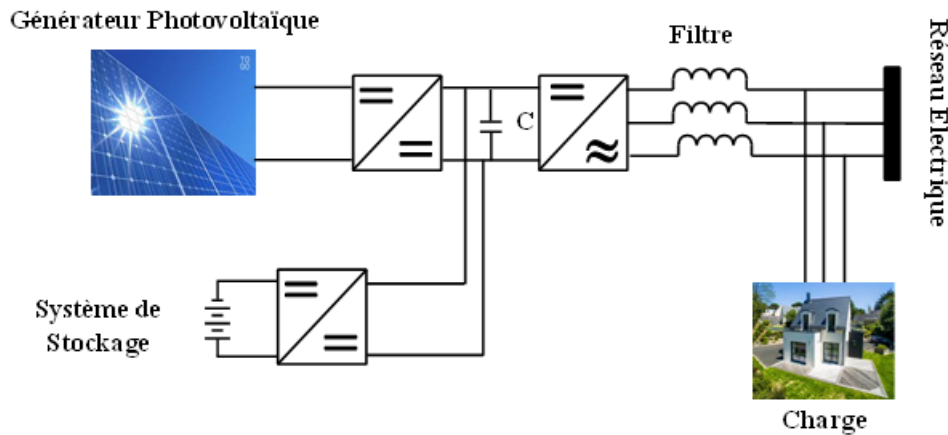


Figure IV.3. Schéma bloc d'un système de conversion photovoltaïque.

#### IV.2.f. . Topologies des installations PV

Les systèmes PV peuvent être structurés en plusieurs configurations opérationnelles. Chaque configuration possède les interfaces électroniques de puissance de base qui relient le système au réseau électrique.

La Figure IV.4 montre la configuration où un onduleur centralisé est utilisé. Cela a été le type le plus utilisé dans le passé. Les panneaux PV sont connectés en série et / ou en parallèle et connectés à un convertisseur CC / CA centralisé.

Le principal avantage de cette conception est le coût le plus bas en raison de la présence d'un seul onduleur.

Cependant, le principal inconvénient de cette configuration est que les pertes de puissance peuvent être élevées en raison de la discordance entre les panneaux PV et la présence des diodes. Un autre inconvénient est que cette configuration n'assure pas la continuité de service en cas de panne de l'onduleur et présente donc moins de fiabilité.

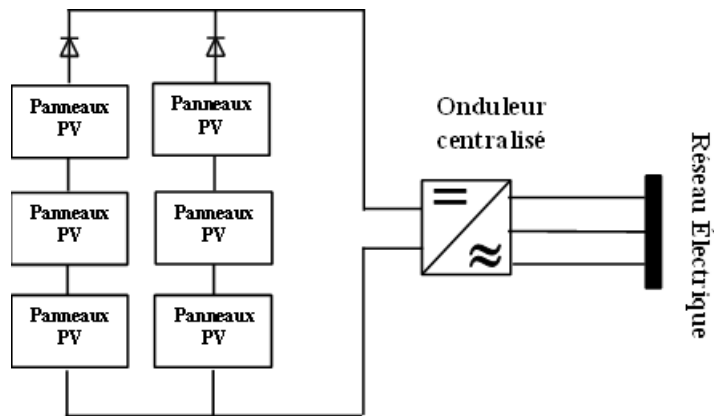


Figure IV. 4. Configuration d'un onduleur centralisée.

La Figure IV.5 montre la configuration des chaînes des panneaux PV avec des onduleurs rangés. Les panneaux PV sont connectés en série sous la forme d'une seule rangée. En règle générale, 15 panneaux sont reliés ensemble en série et interconnectés avec un onduleur par ranger.

Le principal avantage de cette topologie est qu'il n'y a pas de pertes associées aux diodes et qu'un suivi de point de puissance maximale (MPPT) peut être appliqué pour chaque rangée.

Ceci est particulièrement utile lorsque plusieurs rangées sont montées sur des surfaces fixes dans différentes opérations. L'inconvénient de cette configuration est l'augmentation des coûts due aux onduleurs supplémentaires.

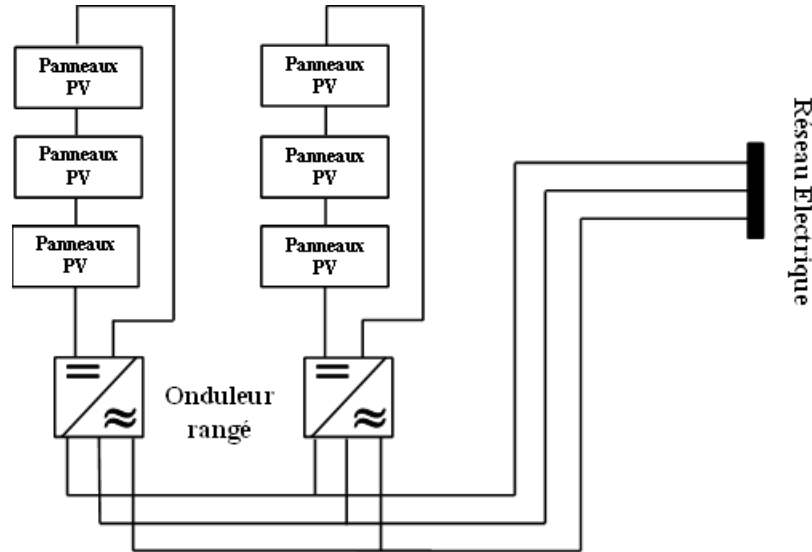
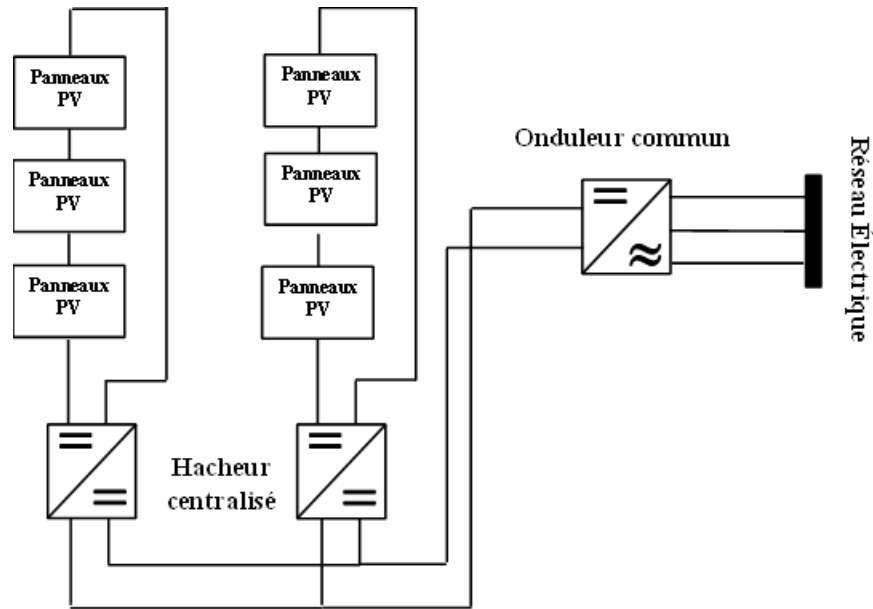


Figure IV. 5. Configuration d'un onduleur rangé.

La Figure IV.6 montre la configuration d'un système PV à plusieurs rangées. Elle utilise un hacheur en bout de chaque rangée du système PV, le tout est connecté à un onduleur central pour l'interfaçage au réseau électrique. Elle est caractérisée par certains avantages tels que le coût réduit par rapport à l'onduleur rangé, chaque convertisseur CC / CC dispose de sa propre commande MPPT. Le dysfonctionnement d'un GPV peut être rapidement localisé et la possibilité d'intégrer un élément de stockage sur le bus continu. Mais, la continuité de service n'est pas assurée en cas de panne de l'onduleur.



**Figure IV. 6.** Panneaux photovoltaïques dans une configuration à plusieurs rangées.

La Figure IV.7 montre une configuration où chaque panneau PV a son propre onduleur. Cette conception est également connue sous le nom de module CA. L'avantage de ce type de configuration est facile d'ajouter des modules car chaque module possède son propre onduleur CC / CA.

Il y a également une amélioration globale de la fiabilité du système car il n'y a pas de panne unique pour le système. En outre, la perte de puissance du système est plus faible en raison de la discordance réduite entre les modules.

Cette configuration semble être une option prometteuse pour les futures conceptions car elle peut être utilisée comme un dispositif insérable par des personnes sans connaissances spécialisées.

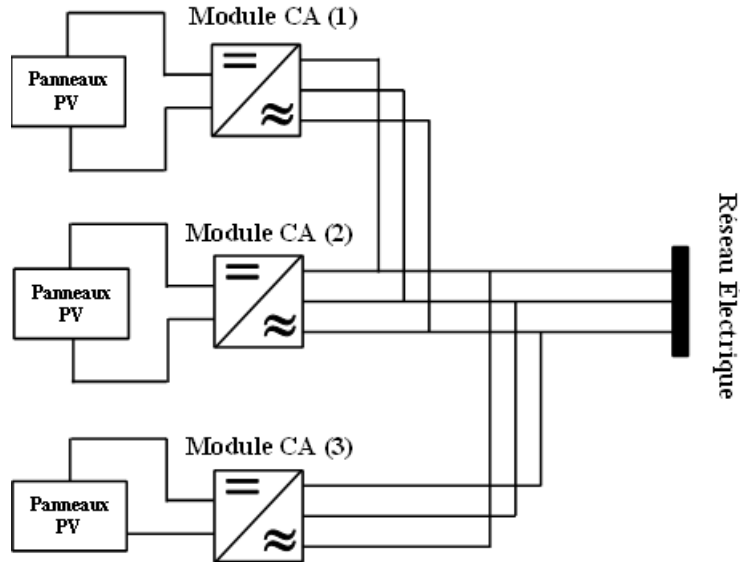


Figure IV. 7. Configuration du module CA.

Une évolution de la topologie d'hacheur rangé est la topologie d'hacheur modulaire parallèle présenté sur la Figure IV.8.

L'hacheur n'est plus connecté à une chaîne de modules PV mais directement à la sortie du module PV. Cette évolution garde tous les avantages de l'hacheur rangé, tout en augmentant le niveau de discrétisation du MPPT. L'inconvénient majeur de cette configuration, est le grand rapport d'élévation entre l'entrée CC et la tension CA côté réseau.

En effet pour un hacheur non isolé, les pertes croient avec le rapport d'élévation, ce dernier limite le rendement de l'hacheur et pénalise cette topologie. Une des solutions pour diminuer le rapport d'élévation, est de mettre la sortie des hacheurs en série. Cette structure dénommée hacheur modulaire série est présentée sur la Figure IV.9.

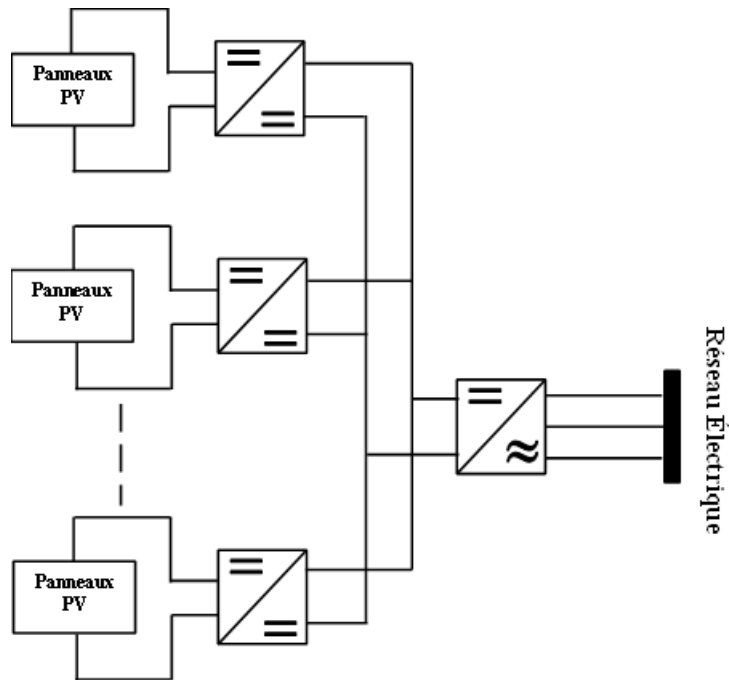


Figure IV. 8. Schéma de principe de la topologie d'un hacheur modulaire parallèle.

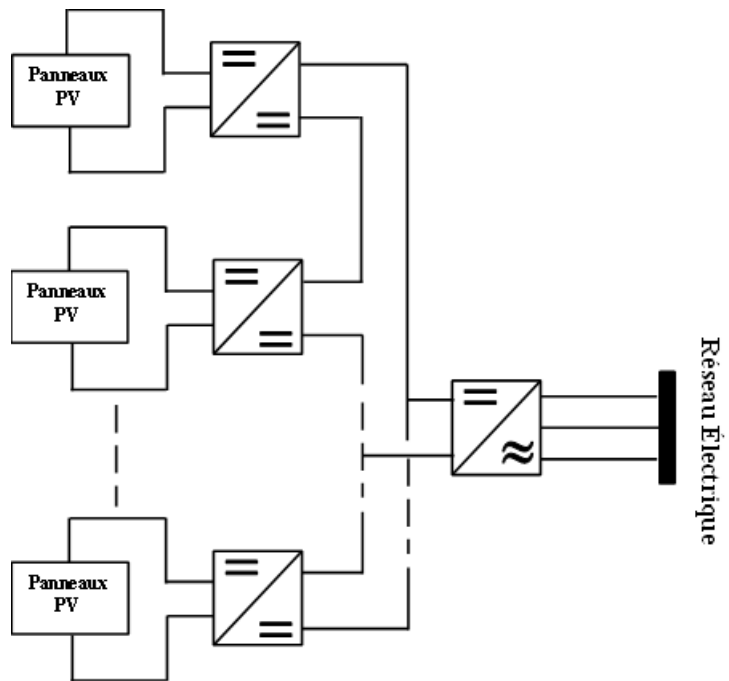


Figure IV. 9. Schéma de principe de la topologie d'un hacheur modulaire série.

### IV.2.g. Raccordement des GPV

Les GPV peuvent être classés en deux catégories :

- Raccordé au réseau,
- Autonome, isolé du réseau.

#### IV.2.g.1. GPV raccordé au réseau

Les systèmes PV, connectés au réseau sont utilisés le plus souvent pour vendre la totalité de l'énergie produite. Dans le cas d'une installation PV domestique, l'électricité issue du GPV peut être auto consommée et le surplus est vendu à l'opérateur du réseau. Dans ce cas, le réseau est utilisé pour l'alimentation en manque d'énergie du GPV.

La Figure IV.10 présente un système PV connecté au réseau électrique. Actuellement, dans la plupart des législations, pour les systèmes PV avec stockage, connectés au réseau, il est interdit de charger les éléments de stockage depuis le réseau. Cette règle est établie afin d'éviter des fraudes éventuelles.

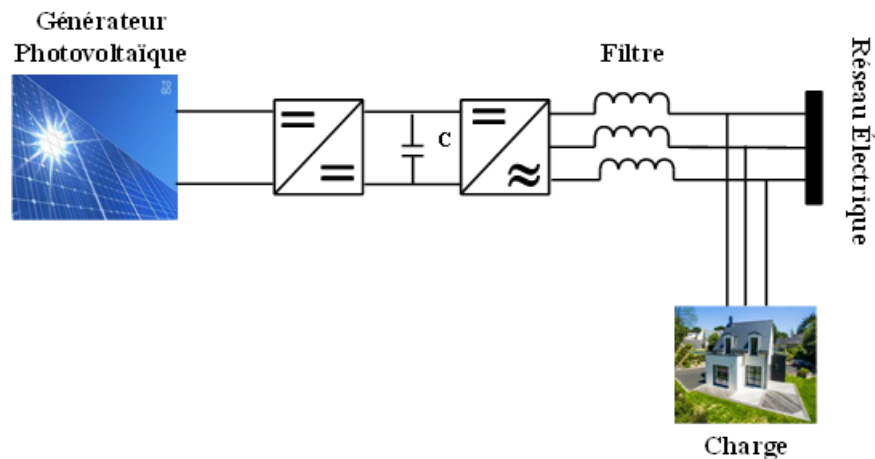
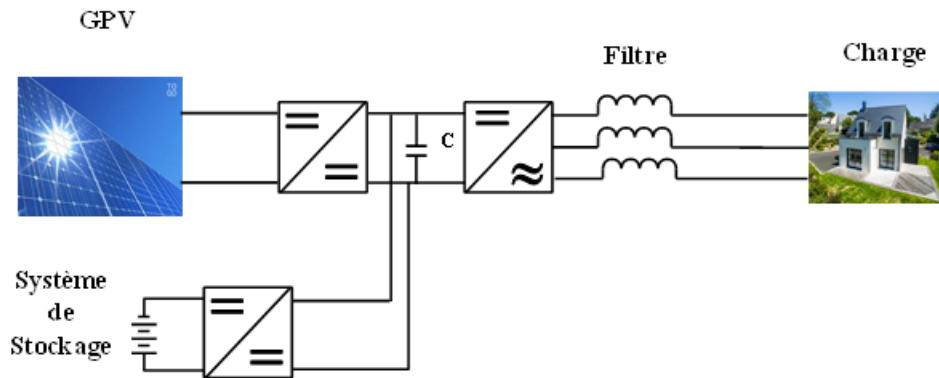


Figure IV. 10. Exemple de système photovoltaïque connecté au réseau de distribution.

#### IV.2.g.2. GPV raccordé au réseau isolé

Les systèmes autonomes sont employés pour alimenter directement les demandes des charges. Ce mode de fonctionnement nécessite une association d'un système de stockage afin d'assurer l'alimentation en cas de panne du GPV.

La Figure IV.11 représente l'exemple d'un système PV / stockage connecté dans le réseau autonome. Le système de stockage est associé au GPV à travers un convertisseur CC-CC bidirectionnel pour assurer l'alimentation continue au fur et à mesure malgré l'intermittence de la production.



**Figure IV. 11.** Exemple d'un système PV/ stockage connecté au réseau autonome.

#### **IV.2.h. Poursuite du point de puissance maximum**

L'efficacité de conversion d'énergie du module PV (module PV : l'association des plusieurs cellule PV en série et en parallèle) est plutôt faible et varie en fonction de l'éclairement et la température.

Le contrôle du suivi du point de puissance maximale d'un module PV est un problème compliqué. Par conséquent, pour surmonter ces problèmes et obtenir une efficacité maximale, le système PV nécessite une application d'un algorithme de MPPT pour le but d'extraire une puissance optimale pour différentes conditions de fonctionnement.

### **IV.3. Energie éolienne**

#### **IV.3.a. Définition Energie éolienne**

L'énergie éolienne est une source renouvelable, exploitant le vent, une ressource propre et inépuisable, pour produire de l'électricité sans émettre de gaz polluants. Cette forme d'énergie n'entraîne aucune émission atmosphérique ni production de déchets radioactifs. Elle fait partie des nouvelles solutions de production d'électricité décentralisée, offrant une alternative viable

à l'énergie thermique, bien que les volumes d'énergie générés par les éoliennes soient généralement bien inférieurs. Les installations peuvent être implantées aussi bien sur terre qu'en mer, où le vent souffle de manière plus constante.

### IV.3.b. Principe de conversion d'énergie éolienne

Le principe de de conversion d'énergie éolienne est illustré dans la Figure IV.12. L'éolienne permet de convertir le flux d'air (énergie cinétique) en un mouvement de rotation (énergie mécanique) qui entraîne ensuite un générateur pour la production d'électricité (énergie électrique).

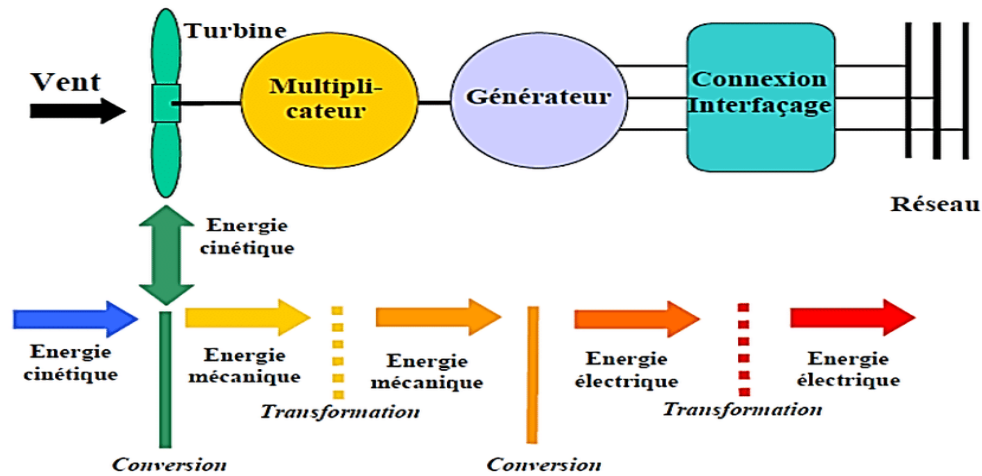


Figure IV. 12. Principe de de conversion d'énergie éolienne.

### IV.3.c. . Différents types d'éoliennes

Il existe deux types principaux d'éoliennes : à l'axe horizontal et à l'axe vertical.

#### IV.3.c.1. Éolienne à axe vertical

La turbine à axe vertical illustrée dans la Figure IV.13 ont des pales fixées au sommet et au bas d'un rotor vertical. Le type le plus courant de turbine à axe vertical, l'éolienne Darrieus, du nom de l'ingénieur français Georges Darrieus qui a breveté le design en 1931, ressemble à un batteur à œufs géant à deux pales. Certaines versions de la turbine à axe vertical font 100 pieds de haut et 50 pieds de large.



Figure IV. 13. Éolienne à axe vertical.

#### *IV.3.c.2. Éolienne à axe horizontal*

La turbine à axe vertical illustrée dans la Figure IV.14 ont des pales comme des hélices d'avion, et elles ont généralement trois pales. Les plus grandes turbines à axe horizontal sont aussi hautes que les bâtiments de 20 étages et ont des pales de plus de 100 pieds de long. Les turbines plus hautes avec des pales plus longues génèrent plus d'électricité. Actuellement, presque toutes les éoliennes utilisent les turbines à axe horizontal.



Figure IV. 14. Éolienne à axe horizontal.

### IV.3.d. Générateurs éoliens

Pour des configurations possibles de système de conversion d'énergie éolienne. Il existe principalement deux types d'éoliennes à base de vitesse : variable ou constante.

#### IV.3.d.1. Éolienne à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les turbines les plus simples en fonctionnement avec un très peu de variation dans la vitesse du rotor de la turbine, et emploient des générateurs Asynchrones à cage d'écureuil directement raccordés au réseau comme illustre la Figure IV.15.

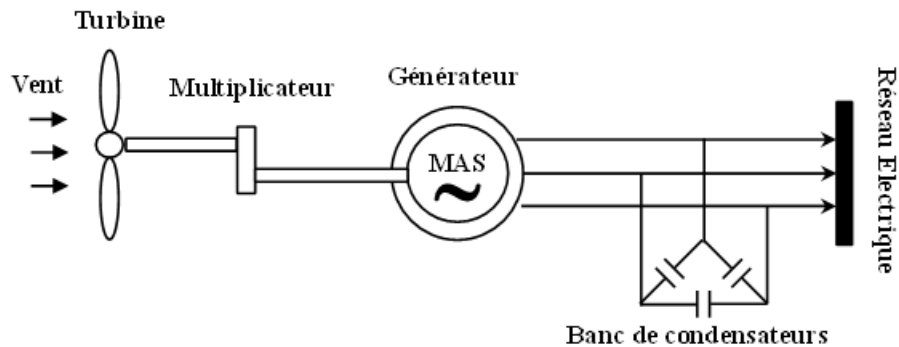


Figure IV. 15. Éolienne à vitesse constante.

Par conséquent, la vitesse de rotation de la génératrice est pratiquement fixée pour différentes vitesses du vent. C'est pour cette raison que cette structure convient à un générateur éolien à vitesse fixe. Il est très robuste, nécessite peu d'entretien et son coût de construction est faible. Il consomme toujours de la puissance réactive. Cette dernière est indésirable et est généralement compensée en partie ou entièrement par des bancs de condensateurs ou autres techniques de la compensation de l'énergie réactive.

#### IV.3.d.2. Éolienne à vitesse variable

L'évolution de l'électronique de puissance a permis d'exploiter les machines électriques à des vitesses variables et d'augmenter la production d'énergie électrique. Cette évolution a permis l'augmentation de la taille des éoliennes, d'une part et le choix de plus en plus fréquent de la vitesse variable, d'autre part.

Les éoliennes à vitesse variable présentent les avantages suivants :

- Une meilleure qualité de l'énergie produite

- Une plus grande efficacité du système.
- Réduction du bruit lors des fonctionnements à une puissance réduite car la vitesse est lente.

On peut distinguer deux types de génératrices pour le système de conversion d'énergie éolienne pour une vitesse variable selon la localité des convertisseurs de puissance.

#### *A. Eoliennes à vitesse variable commandées par le stator*

Les machines qui sont couramment utilisées pour ce type d'éoliennes, indirectement couplées au réseau, sont les Machines Asynchrone (MAS) à cage et Synchrone (MS) à aimant permanent.

Elles sont généralement couplées à la turbine via un multiplicateur de vitesse présentée dans Figure IV.16.a, tandis que la MS à rotor multipôles est couplée directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur de vitesse présentée dans la Figure IV.16.b.

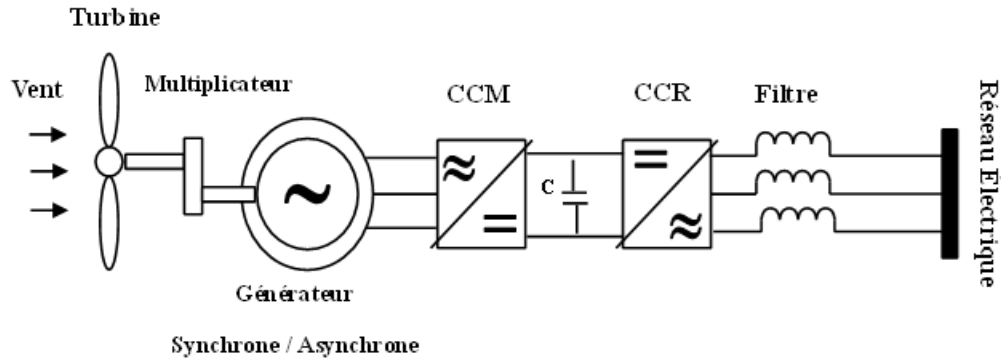
Le Convertisseur Côté Réseau (CCR) permet d'injecter des courants de fréquence fixe correspondant à celle du réseau et avec la possibilité de régler le facteur de puissance (puissance réactive).

Le Convertisseur Côté Machine (CCM) assure le contrôle de la puissance générée en agissant sur la vitesse du générateur.

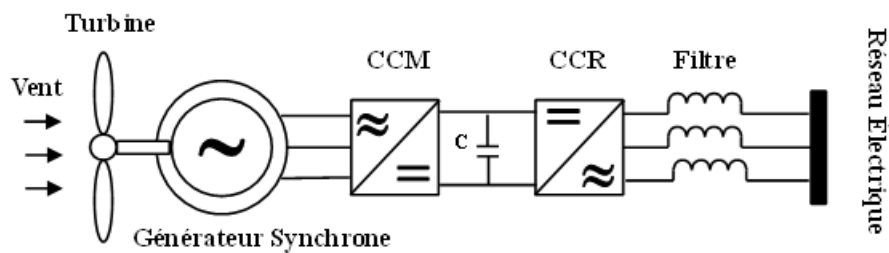
La liaison de ces convertisseurs au réseau est réalisée au moyen de trois filtres (RL) permettant de réduire les harmoniques de courant.

Malgré le fonctionnement à vitesse variable, cette technologie d'éolienne présente quelques inconvénients :

- Le dimensionnement des convertisseurs et des filtres utilisés pour transporter la totalité de la puissance échangée entre la machine et le réseau. Cela engendre des problèmes de conception, d'encombrement et également une répercussion sur le coût.
- L'augmentation des pertes des convertisseurs de puissance avec l'augmentation de la puissance des éoliennes, ce qui influe sur le rendement du système éolien.



(a) Éolienne à vitesse variable basée sur une MAS à cage ou la MS à aimant permanent.



(b) Éolienne à vitesse variable basée sur la MS à rotor multipôles.

**Figure IV. 16.** Éoliennes à vitesse variable commandées par le stator.

### ***B. Éoliennes à vitesse variable commandées par le rotor***

Cette configuration est basée sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), son stator est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers deux convertisseurs statiques comme le montre la Figure IV.17.

Si le générateur fonctionne en mode super-synchrone, il fournit de l'énergie au réseau par le rotor via les convertisseurs. S'il fonctionne en mode sous-synchronisme, le rotor absorbe de la puissance à partir de réseau à travers les convertisseurs.

En effet, dans le domaine éolien, la MADA procure plusieurs avantages :

- Le convertisseur lié au rotor est caractérisé par : moins de volume, moins de coût, un système de refroidissement moins lourd et moins de perturbations.
- Les pertes liées aux convertisseurs statiques sont diminuées et le rendement du système de générateur amélioré.
- Le dimensionnement des filtres est réduit.

- Le facteur de puissance peut être réglé, conséquence du contrôle indépendant des puissances actives et réactives mis en œuvre par le CCM.
- Cette structure n'a besoin ni de compensateur d'énergie réactive ni d'un démarreur.
- La bidirectionnalité du convertisseur permet le fonctionnement dans les deux modes.

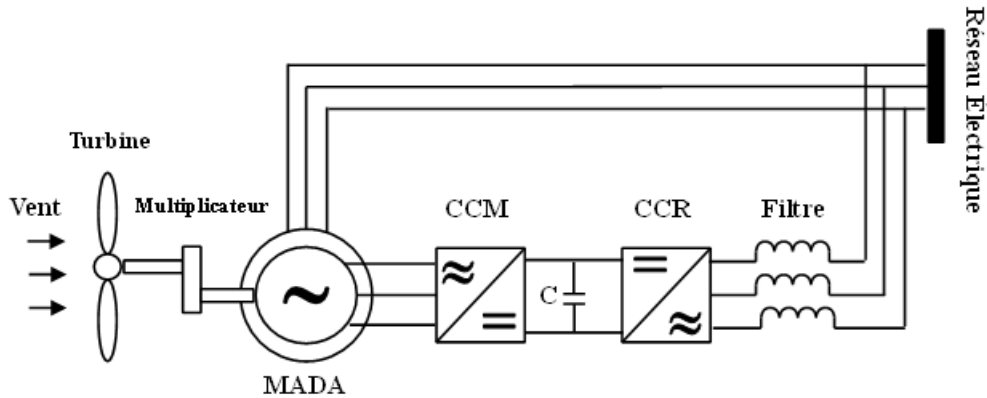


Figure IV. 17. Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

#### IV.4. Conclusion

Ce chapitre a présenté en détail deux sources d'énergie renouvelable : le photovoltaïque et l'éolien. Nous avons exploré les différentes composantes de chaque système ainsi que leurs principes de fonctionnement respectifs. Chacune de ces technologies offre des solutions durables pour la production d'électricité, avec des caractéristiques et des avantages propres. Leur complémentarité permet de diversifier les sources d'énergie propres, contribuant ainsi à la réduction de la dépendance aux énergies fossiles et à la transition vers un avenir énergétique plus respectueux de l'environnement.

# Chapitre V

## Chapitre V. Sources d'énergie autonomes avec systèmes de stockage

### V.1.Introduction

Dans un contexte marqué par la croissance des systèmes électroniques portables, des réseaux intelligents et des applications isolées du réseau électrique, les sources d'énergie autonomes jouent un rôle essentiel. Ces systèmes nécessitent des solutions capables de stocker, gérer et restituer l'énergie de manière fiable et efficace afin d'assurer un fonctionnement continu et sécurisé.

Ce cinquième chapitre est consacré à l'étude des systèmes de stockage d'énergie, éléments clés des sources d'énergie autonomes. Il aborde principalement les batteries, les condensateurs et d'autres technologies émergentes de stockage, en mettant en évidence leurs principes de fonctionnement, leurs caractéristiques électriques, ainsi que leurs avantages et limites selon les applications envisagées.

L'objectif est de fournir aux étudiants une compréhension approfondie des différentes technologies de stockage, de leurs critères de choix et de leur intégration dans des systèmes autonomes. Cette analyse permettra d'orienter la conception de solutions énergétiques adaptées aux besoins actuels, notamment dans les domaines des systèmes embarqués, des énergies renouvelables et de l'électronique de puissance.

### V.2. Systèmes électriques autonomes

Un système électrique autonome est principalement adopté dans les zones où le réseau public est inexistant ou trop éloigné du lieu d'installation. Il constitue une source d'énergie indépendante permettant d'alimenter des usagers en électricité sans raccordement au réseau électrique. Ce type de système présente une grande fiabilité, car il n'est pas affecté par les coupures de courant dues aux conditions climatiques ou aux défaillances du réseau. Il est couramment utilisé pour l'alimentation des habitations situées en sites isolés, sur des îles, en zones montagneuses, ainsi que pour des applications telles que le pompage de l'eau.

Les systèmes solaires, éoliens et micro-hydrauliques, qui reposent sur des sources d'énergie renouvelables, sont généralement intégrés dans les systèmes électriques autonomes. Toutefois,

de nombreux sites à travers le monde produisent encore leur électricité exclusivement à l'aide de groupes électrogènes diesel, lesquels génèrent du bruit, de la pollution et impliquent des coûts élevés liés au carburant. L'intégration d'un système de stockage d'énergie dans un système électrique autonome permet de réduire la consommation de carburant et, par conséquent, les coûts d'exploitation. De plus, le stockage d'énergie est indispensable lorsque les ressources utilisées sont intermittentes, comme dans le cas des systèmes photovoltaïques ou éoliens. En pratique, un système autonome ne peut généralement pas répondre à lui seul de manière continue à l'ensemble de la demande énergétique des utilisateurs.

### **V.3. Définition de système de stockage**

Le stockage de l'énergie électrique repose sur le principe de conversion de l'énergie électrique produite par une source d'alimentation en une forme d'énergie plus facilement stockable. Cette transformation permet de conserver l'énergie sur une certaine durée afin de l'utiliser ultérieurement. Le processus inverse, appelé déstockage, consiste à reconvertir l'énergie stockée en énergie électrique pour l'alimentation des charges. L'ensemble des opérations de stockage et de déstockage constitue un cycle de fonctionnement, dont les performances sont évaluées à travers des paramètres tels que le rendement, la capacité de stockage et les pertes énergétiques.

L'énergie électrique peut être stockée selon différentes formes physiques, notamment l'énergie mécanique, thermique, électrochimique et électrostatique. Chaque technologie de stockage possède des caractéristiques spécifiques qui conditionnent son choix en fonction de l'application visée, en particulier dans les systèmes électriques autonomes et les installations utilisant des sources d'énergie renouvelables.

### **V.4. Les principales applications du stockage d'énergie**

On distingue principalement deux grandes catégories d'applications de l'électricité : les applications stationnaires (fixes) et les applications embarquées (mobiles).

Le stockage d'énergie thermique concerne presque exclusivement les installations stationnaires, tandis que le stockage électrique est utilisé aussi bien dans les systèmes fixes que mobiles.

Dans le cas des applications stationnaires, le stockage d'énergie peut remplir plusieurs fonctions essentielles. Il permet tout d'abord la fourniture d'énergie, en compensant les insuffisances liées à l'intermittence des sources de production, en répondant aux pics de demande ou en corrigeant le décalage temporel entre la production et la consommation. Il assure également une fonction de secours, en prenant le relais en cas de défaillance ou d'interruption de l'alimentation électrique. Enfin, le stockage peut servir à la récupération d'énergie, en stockant les excédents de production pour une utilisation ultérieure.

Les applications stationnaires peuvent nécessiter des niveaux d'énergie stockée et des puissances instantanées très élevés. Leur dimensionnement n'est généralement pas limité par des contraintes de masse ou de volume, tandis que les critères économiques, environnementaux et de fiabilité constituent des éléments déterminants dans leur conception.

Dans le cas des systèmes mobiles, le stockage d'énergie, essentiellement sous forme électrique, est embarqué à bord de moyens de transport (automobiles, trains, avions, navires) ou d'équipements électroniques autonomes. Il peut assurer différentes fonctions, telles que la propulsion, notamment dans les véhicules électriques, ou le fonctionnement en mode hybride, où le stockage permet d'assister une motorisation thermique afin d'optimiser les performances globales et de réduire la consommation de carburant.

Le stockage peut également alimenter des systèmes auxiliaires, tels que le démarrage, l'éclairage, le chauffage ou l'électronique embarquée, ainsi que fournir de l'énergie aux équipements portables, généralement de faible puissance, comme les ordinateurs, téléphones ou autres appareils électroniques.

Dans les applications mobiles, les niveaux d'énergie et de puissance requis sont généralement inférieurs à ceux des applications stationnaires. Toutefois, en plus des critères économiques et environnementaux, des contraintes strictes de masse, de volume et de densité énergétique doivent être respectées, ce qui impose le recours à des systèmes de stockage compacts et fortement concentrés en énergie.

### V.5. Les caractéristiques des systèmes de stockage

Les systèmes de stockage de l'énergie électrique (SEE) doivent satisfaire un ensemble de caractéristiques communes afin de garantir leur efficacité, leur fiabilité et leur adaptation aux différentes applications. Ces critères permettent d'évaluer les performances techniques et économiques des technologies de stockage et d'orienter leur choix selon les besoins énergétiques. Les principales caractéristiques des systèmes de stockage d'énergie sont récapitulées dans le tableau V.1.

**Tableau V. 1.** Comparatif des caractéristiques des systèmes de stockage de l'énergie.

Caractéristique	Définition	Importance / Impact
Rendement de cycle	Rapport entre l'énergie restituée lors de la décharge et l'énergie fournie durant la charge	Réduction des pertes énergétiques et amélioration de l'efficacité globale
Durée de vie	Nombre de cycles charge/décharge avant une diminution significative de la capacité	Fiabilité accrue du système et réduction des coûts de remplacement
Taux d'autodécharge	Perte d'énergie en l'absence de charge connectée	Critère essentiel pour le stockage d'énergie à long terme
Densité énergétique	Quantité d'énergie stockée par unité de masse ou de volume	Paramètre déterminant pour les applications mobiles et portables
Densité de puissance	Puissance maximale délivrée par unité de masse ou de volume	Importante pour les applications nécessitant des appels de puissance élevés
Coût d'investissement	Coût par unité d'énergie stockée et par unité de puissance fournie	Déterminant pour la faisabilité économique du système

## V.6. Différents types de stockage d'énergie

Il existe plusieurs types de stockage d'énergie, classés selon la forme sous laquelle l'énergie est emmagasinée. Le stockage mécanique repose sur l'accumulation d'énergie sous forme de mouvement ou de position, comme dans les volants d'inertie ou les stations de pompage-turbinage. Le stockage thermique consiste à conserver l'énergie sous forme de chaleur, souvent utilisé dans les installations stationnaires. Le stockage électrochimique, représenté principalement par les batteries, permet de convertir l'énergie électrique en énergie chimique réversible. Le stockage électrostatique, comme les condensateurs et supercondensateurs, stocke l'énergie dans un champ électrique, tandis que le stockage chimique, notamment via l'hydrogène, offre des perspectives intéressantes pour le stockage de grande capacité et de longue durée.

### V.6.a. . Batterie électrochimique

Une batterie est un ensemble de cellules électrochimiques reliées entre elles pour fournir un générateur électrique avec la tension et la capacité souhaitées. Chaque cellule est constituée de deux électrodes immergées dans un électrolyte. Les batteries rechargeables, couramment utilisées dans les appareils électriques et électroniques domestiques (téléphones, ordinateurs portables), convertissent l'énergie électrique en énergie chimique lors de la charge et restituent l'énergie chimique en énergie électrique lors de la décharge.

L'état de charge (SoC, State of Charge) est une grandeur clé d'une batterie, définie comme le rapport entre la capacité actuelle et la capacité maximale de la batterie. Le SoC est de 100 % lorsque la batterie est complètement chargée et 0 % lorsqu'elle est entièrement déchargée. La tension d'une batterie dépend directement de son SoC.

Le fonctionnement d'une batterie repose sur des réactions d'oxydoréduction entre les électrodes et l'électrolyte, entraînant le mouvement des électrons et des ions, ce qui génère un courant électrique de la cathode vers l'anode.

Selon leur usage, les batteries peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Batteries de démarrage : utilisées principalement dans les véhicules pour le démarrage du moteur.

- Batteries de traction : utilisées dans les chariots élévateurs, véhicules électriques ou hybrides, pour la propulsion.
- Batteries stationnaires : employées dans les systèmes d'alimentation sans interruption (ASI) ou pour le stockage d'énergie dans les installations fixes.

#### V.6.b. Les condensateurs

Les condensateurs permettent de stocker l'énergie directement sous forme électrostatique, grâce à l'accumulation de charges électriques sur deux armatures séparées par un diélectrique. Ils sont largement utilisés dans de nombreux domaines de l'électronique tels que les télécommunications, l'informatique, l'automobile et l'aéronautique. Leurs applications courantes incluent le filtrage, le découplage, la liaison de signaux, les circuits oscillants et résonants, ainsi que la compensation en température.

Les supercondensateurs, également appelés condensateurs électrochimiques à double couche, se distinguent par des capacités très élevées, allant de quelques farads à plusieurs milliers de farads. Leur structure est constituée de deux collecteurs métalliques, généralement en aluminium, de deux électrodes poreuses en charbon actif imprégnées d'un électrolyte liquide, et d'un séparateur assurant la conduction ionique tout en empêchant la conduction électronique. Lorsqu'une tension est appliquée, une double couche électrique se forme à l'interface électrode-électrolyte (effet Helmholtz), créant un stockage d'énergie équivalent à celui d'un condensateur dont la capacité dépend principalement de la surface effective de contact.

Contrairement aux batteries électrochimiques, les supercondensateurs stockent et restituent l'énergie sans réaction chimique, ce qui leur confère un excellent comportement dynamique et un rendement élevé, généralement compris entre 95 % et 98 %. Ils présentent de nombreux avantages, tels qu'une très longue durée de vie pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de cycles, une densité de puissance élevée (de l'ordre de 2000 à 4000 W/kg), une charge et une décharge très rapides, de faibles pertes énergétiques dues à une faible résistance série, ainsi que de bonnes performances à basse température.

Cependant, les supercondensateurs présentent également certaines limitations, notamment une faible densité énergétique (environ 10 Wh/kg), une plage de tension limitée par cellule (environ 2,5 à 2,7 V), un comportement non linéaire, ainsi qu'une technologie encore moins mature que celle des batteries, impliquant des contraintes de sécurité.

Grâce à leurs caractéristiques, les supercondensateurs trouvent des applications variées, notamment dans les véhicules électriques et hybrides pour l'assistance à la propulsion et la récupération d'énergie, dans les transports urbains pour les démarrages fréquents ou l'alimentation entre stations, en électronique pour la sauvegarde temporaire de données, ainsi que dans les systèmes embarqués, isolés et aéronautiques, où leur forte densité de puissance est un atout majeur.

#### **V.6.c. . Les condensateurs**

Le volant d'inertie permet de stocker temporairement de l'électricité sous forme d'énergie cinétique de rotation. Il se compose d'une masse, généralement cylindrique et creuse ou pleine, mise en rotation autour d'un axe fixe et enfermée dans une enceinte sous vide pour réduire les frottements.

La masse est couplée à une machine électrique qui transforme l'énergie électrique en énergie cinétique lors de la charge et inversement lors de la restitution de l'énergie. Lorsque le moteur électrique accélère le volant, celui-ci atteint des vitesses très élevées en peu de temps. Une fois le moteur arrêté, le volant continue de tourner, conservant ainsi l'énergie stockée. Pour restituer cette énergie, la machine fonctionne en génératrice, ce qui entraîne une diminution progressive de la vitesse de rotation du volant.

L'énergie stockée par le volant est proportionnelle à la masse et au carré de la vitesse de rotation, ce qui permet de moduler la capacité de stockage en jouant sur ces paramètres. Ces systèmes présentent l'avantage d'une maintenance réduite et d'une longue durée de vie, généralement supérieure à 20 ans.

#### **V.6.d. . Stockage par compression de l'air**

Le stockage par air comprimé (Compressed Air Energy Storage, CAES) repose sur la propriété élastique de l'air. Durant les périodes de faible consommation électrique, l'électricité excédentaire à faible coût alimente des compresseurs à haute pression (100 à 300 bars) qui compriment l'air dans des cavités naturelles ou artificielles, telles que des cavités salines ou d'anciennes mines. Cette opération permet de stocker de l'énergie sous forme d'énergie potentielle.

Lorsque la demande en électricité augmente, le processus est inversé : l'air comprimé est détendu dans une turbine, entraînant un alternateur qui produit de l'électricité. Ce système permet ainsi de restaurer l'énergie stockée pour répondre aux pics de consommation.

#### **V.6.e. . Les piles à combustible**

La pile à combustible PEM convertit l'énergie chimique en énergie électrique en utilisant l'oxydoréduction de l'hydrogène et de l'oxygène pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. Elle fonctionne sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau et son architecture est proche de celle d'une batterie.

Pour assurer son fonctionnement, la pile est accompagnée de systèmes auxiliaires :

- Alimentation en hydrogène et en air (oxygène) pour la réaction chimique.
- Évacuation de l'eau formée lors de la réaction.
- Refroidissement pour maintenir une température optimale.
- Supervision et contrôle pour coordonner l'ensemble des composants et garantir la sécurité et la performance du système.

La pile à combustible PEM est particulièrement adaptée aux applications nécessitant une production continue d'électricité propre, avec comme sous-produits uniquement de l'eau et de la chaleur.

#### **V.6.f. . L'hydrogène**

L'hydrogène est un gaz léger et simple qui, lorsqu'il brûle avec l'oxygène, produit de l'eau et une grande quantité d'énergie. Il peut également fournir de l'électricité via une pile à

combustible, en produisant de l'eau comme sous-produit. Comme ces procédés ne génèrent pas de CO<sub>2</sub>, l'hydrogène est envisagé comme un substitut potentiel aux hydrocarbures liquides et gazeux dans le futur.

L'hydrogène n'existant pas à l'état libre dans la nature, il doit être produit à partir d'autres sources d'énergie, par exemple par électrolyse de l'eau. Dans les années 1980, il avait été envisagé de produire de l'hydrogène en masse durant les heures creuses via les centrales nucléaires, afin de stocker indirectement l'énergie électrique excédentaire. Cette approche permettait de maintenir une production constante et sans contraintes thermiques des centrales. Cependant, le projet a été abandonné à l'époque pour des raisons économiques et technologiques, notamment l'impossibilité de reconvertir efficacement l'hydrogène en électricité sans piles à combustible.

Aujourd'hui, il est possible de brûler l'hydrogène dans des centrales électriques spécialement adaptées, permettant de considérer l'hydrogène comme un vecteur de stockage indirect de l'électricité, ouvrant la voie à de nouvelles applications dans le cadre des énergies renouvelables et de la transition énergétique.

Le tableau V.2 regroupe les principales technologies de stockage d'énergie abordées dans ce chapitre, en présentant leur principe, leurs avantages, leurs limites et leurs applications typiques.

Tableau V. 2. Principales technologies de stockage d'énergie.

Technologie	Principe de stockage	Avantages	Inconvénients	Applications typiques
<b>Batteries</b>	Stockage électrochimique (réactions d'oxydoréduction)	Rechargeables, énergie concentrée, portable	Durée de vie limitée, densité de puissance moindre	Téléphones, ordinateurs, véhicules électriques, ASI
<b>Supercondensateurs</b>	Stockage électrostatique (double couche électrique)	Très longue durée de vie, densité de puissance élevée, charge/décharge rapide	Faible densité énergétique, tension limitée, technologie moins mature	Véhicules hybrides, transport urbain, sauvegarde mémoire, systèmes embarqués
<b>Volant d'inertie</b>	Stockage mécanique (énergie cinétique de rotation)	Très longue durée de vie (>20 ans), faible maintenance, rendement élevé	Énergie spécifique limitée, volume important	Compensation de puissance, stockage temporaire, stabilisation réseau
<b>Pile à combustible PEM</b>	Conversion chimique → électrique via oxydoréduction H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	Production continue d'électricité propre, rendement élevé, pas de CO <sub>2</sub>	Nécessite hydrogène pur, coûts et complexité des accessoires	Véhicules électriques à hydrogène, production stationnaire d'électricité
<b>Air comprimé (CAES)</b>	Stockage potentiel via compression d'air	Capacité élevée, adapté aux installations fixes	Rendement modéré, nécessite cavités adaptées	Régulation de réseau, stockage à grande échelle
<b>Hydrogène</b>	Stockage chimique et énergétique (H <sub>2</sub> produit par électrolyse)	Grande capacité, vecteur énergétique, émissions nulles de CO <sub>2</sub>	Production coûteuse, rendement global limité, infrastructure complexe	Stockage d'électricité renouvelable, carburant pour piles à combustible, centrales spécialisées

## V.7.Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence le rôle fondamental des systèmes de stockage d'énergie dans le fonctionnement des sources d'énergie autonomes. Face à l'intermittence des ressources renouvelables et à la nécessité d'assurer une alimentation électrique fiable et continue, le stockage constitue un élément clé pour l'équilibrage entre production et consommation d'énergie.

Les différentes technologies de stockage étudiées – notamment les batteries, les supercondensateurs, les volants d'inertie, le stockage par air comprimé, les piles à combustible et le stockage par hydrogène – présentent des principes de fonctionnement, des performances et des domaines d'application variés. Aucune solution unique ne répond à l'ensemble des besoins ; le choix d'un système de stockage dépend donc fortement des critères techniques, économiques et environnementaux, tels que la densité énergétique, la durée de vie, le rendement, le coût et les contraintes d'intégration.

Enfin, l'association judicieuse de plusieurs technologies de stockage au sein d'un même système, notamment dans les applications autonomes et les systèmes hybrides, apparaît comme une solution prometteuse pour améliorer la fiabilité, l'efficacité énergétique et la durabilité des installations. Les systèmes de stockage d'énergie constituent ainsi un levier essentiel pour le développement des énergies renouvelables et la transition vers des systèmes énergétiques plus durables.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Ce polycopié de cours a permis de développer une vision globale et progressive des notions fondamentales liées à l'énergie et à ses applications dans les systèmes électriques modernes. À travers les cinq chapitres, les concepts ont été introduits de manière graduelle, depuis les bases théoriques jusqu'aux applications pratiques et technologiques.

Le premier chapitre a posé les fondements nécessaires à la compréhension de l'énergie, en définissant cette grandeur physique essentielle, ses modes de mesure ainsi que la notion de puissance en courant continu et en courant alternatif. L'étude des instruments de mesure a permis d'établir un lien direct entre les concepts théoriques et leur mise en œuvre pratique. Le deuxième chapitre a ensuite élargi cette approche en présentant les différentes formes d'énergie et les mécanismes de conversion entre elles, soulignant leur importance dans les systèmes physiques et les technologies actuelles.

Les chapitres trois et quatre ont été consacrés aux sources de production de l'énergie électrique. Ils ont mis en évidence les limites des sources fossiles ainsi que le potentiel des énergies renouvelables, en particulier le photovoltaïque et l'éolien. L'analyse des principes de fonctionnement et des composants de ces systèmes a montré leur rôle central dans la transition vers des solutions énergétiques plus propres et durables.

Enfin, le cinquième chapitre a souligné l'importance stratégique des systèmes de stockage d'énergie dans les sources d'énergie autonomes. L'étude des batteries, des condensateurs et d'autres technologies de stockage a mis en évidence leur rôle clé dans la gestion de l'intermittence des sources renouvelables et dans l'assurance d'une alimentation électrique fiable et continue. Le choix et l'intégration appropriés des solutions de stockage apparaissent ainsi comme des enjeux majeurs pour le développement des systèmes énergétiques modernes.

En conclusion, ce polycopié fournit aux étudiants les bases théoriques et techniques nécessaires pour comprendre, analyser et concevoir des systèmes énergétiques performants et durables. Il constitue un socle essentiel pour aborder des études plus avancées dans les domaines de l'énergie, de l'électronique de puissance et des systèmes électriques, tout en sensibilisant aux défis énergétiques et environnementaux actuels.

# Références bibliographiques

- [1] G. N. Tiwari et R. K. Mishra, *Advanced renewable energy sources*. Royal Society of Chemistry, 2012. [En ligne]. Disponible sur: [https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=s8gng2vA\\_88C&oi=fnd&pg=PA483&dq=Renewable+Energy+Resources+/+Second+edition&ots=ucebdbgsl8o&sig=94YrmQoHW M-H6hH0o9KWWaSBDeA](https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=s8gng2vA_88C&oi=fnd&pg=PA483&dq=Renewable+Energy+Resources+/+Second+edition&ots=ucebdbgsl8o&sig=94YrmQoHW M-H6hH0o9KWWaSBDeA)
- [2] « Cours Energies Renouvelables PDF | PDF | Semi-conducteurs | Cellule photovoltaïque ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scribd.com/doc/126178633/COURS-ENERGIES-RENOUVLABLES-pdf>
- [3] Z. Behnam, « Course: Global Energy Transitions and Climate Policy lecture 4. Systems Integration of Renewable Energy Sources ».
- [4] « Énergie - Énergies renouvelables et efficacité énergétique ».
- [5] « guide-energies-renouvelables-web-RNCREQ.pdf ». [En ligne]. Disponible sur: <https://rncreq.org/wp-content/uploads/2024/05/guide-energies-renouvelables-web-RNCREQ.pdf>
- [6] M. V. G. Krishna, « IV Year B. Tech II- Semester MECHANICAL ENGINEERING AY: 2022-23 ».
- [7] « lecture1428910296.pdf ». [En ligne]. Disponible sur: [https://www.vssut.ac.in/lecture\\_notes/lecture1428910296.pdf](https://www.vssut.ac.in/lecture_notes/lecture1428910296.pdf)
- [8] C. Beauger *et al.*, « Livre blanc «Produire, Stocker et utiliser l'hydrogène» », PhD Thesis, Institut Carnot MINES, 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-04645366/>
- [9] « Polycope de Cours - Energie Renouv | PDF | Économie énergétique | Énergie hydroélectrique ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scribd.com/document/533945951/Polycope-de-cours-Energie-Renouv>
- [10] M. Gross et R. Mautz, *Renewable energies*. Routledge, 2014. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780203798027/renewable-energies-matthias-gross-r%C3%BCdiger-mautz>
- [11] B. Sørensen, *Renewable energy*. Academic Press, 2004. [En ligne]. Disponible sur: [https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=Y17FoN2VUEwC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Renewable+Energy+Resources+/+Second+edition&ots=VO8GUp9aFc&sig=cKwmd6Sw WhWsFzTtrgQLMc\\_kd9c](https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=Y17FoN2VUEwC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Renewable+Energy+Resources+/+Second+edition&ots=VO8GUp9aFc&sig=cKwmd6Sw WhWsFzTtrgQLMc_kd9c)
- [12] J. Twidell, *Renewable energy resources*. Routledge, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780429452161/renewable-energy-resources-john-twidell>
- [13] J. W. Twidell et A. D. Weir, *Renewable energy resources*, 2. ed., Reprinted. London: Taylor & Francis, 2010.
- [14] R. Ehrlich, H. A. Geller, et J. R. Cressman, *Renewable energy: a first course*. CRC press, 2022. [En ligne]. Disponible sur:

<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781003172673/renewable-energy-harold-geller-john-cressman-robert-ehrllich>

- [15] P. Fornasiero et M. Graziani, *Renewable resources and renewable energy: a global challenge*. CRC press, 2011. [En ligne]. Disponible sur: [https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=Th\\_OBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Renewable+Energy+Resources+/+Second+edition&ots=lfQxTuD7XR&sig=ZQe4xwa93kt81jL8eLK564f8MpA](https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=Th_OBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Renewable+Energy+Resources+/+Second+edition&ots=lfQxTuD7XR&sig=ZQe4xwa93kt81jL8eLK564f8MpA)
- [16] P. Bourke, M. Poirier, et V. Poirier, « Responsable de la publication ».
- [17] H. DRAWIN, « Revue de livres », [En ligne]. Disponible sur: [https://jphys.journaldephysique.org/articles/jphys/pdf/1976/09/jphys\\_1976\\_\\_37\\_9\\_1083\\_0.pdf](https://jphys.journaldephysique.org/articles/jphys/pdf/1976/09/jphys_1976__37_9_1083_0.pdf)