



Université A. MIRA – Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie
Electrique

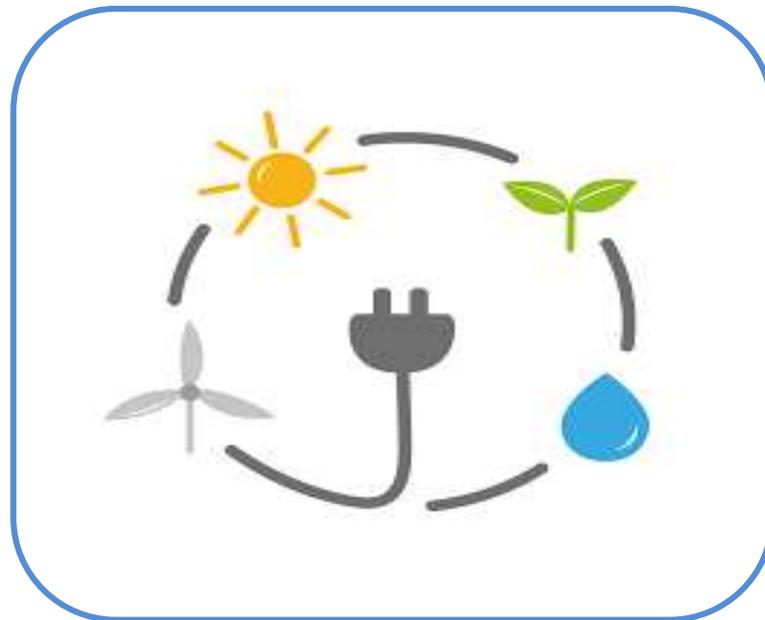


Polycopié de cours

Energies Renouvelables

Dr. HAMOUCHE Née SERIR Chafiaa

Maître de Conférences Classe B



Année universitaire 2022/2023

Avant propos

Ce cours « Energies Renouvelables » (UED111) est un module semestriel (1er semestre), destiné aux étudiants de la première année Master en Electrotechniques, Université A. MIRA – Bejaia, Département de Génie Electrique. Ce travail a été effectué à base de la collecte de données précises et ciblés afin de faciliter la compréhension aux étudiants. J'ai assuré ce cours durant les années universitaires 2017---2022 et actuellement durant l'année universitaire 2022/2023.

Ce polycopie de cours intitulé " Energies Renouvelables", est divisé en cinq chapitres selon le sommaire qui suit.

Enseignante : Dr. HAMOUCHE née SERIR Chafiaa

Maître de Conférences Classe B

E-mail: chafiaa.serir@univ-bejaia.dz

Chapitre I : Introduction aux énergies renouvelables

I.1 Energie.....	7
I.2. Ressources d'énergies fossiles.....	9
I.2.1. Pétrole.....	9
I.2.2. Gaz naturel.....	10
I.2.3. Charbon.....	10
I.2.4. Avantages et inconvénients.....	11
A. Avantages.....	11
B. Inconvénients.....	11
I.3.Energie Nucléaire.....	11
I.3.1. Utilisation et installations.....	12
A. Mines d'uranium.....	12
B. Centrales nucléaires.....	12
C. Déchets radioactifs.....	12
I.3.2. Avantages et inconvénients.....	13
A. Avantages.....	13
B. Inconvénients.....	13
I.4. Sources d'énergie renouvelables.....	13
I.4.1. Energie solaire.....	14
A .Avantages.....	14
B. Inconvénients.....	14
I.4.2. Energie éolienne.....	14
A. Avantages.....	14
B. Inconvénients.....	15
I.4.3. Energie hydraulique.....	15
I.4.4. Energie biomasse.....	15
I.4.5. Energie géothermique.....	15

Chapitre II: Energie solaire

II.1. Introduction.....	16
II.2. Rayonnement solaire.....	16
II.3. Energie solaire.....	17
II.3.1. Energie solaire thermique.....	17
II.3.1.1. Les différentes technologies des capteurs solaires thermiques.....	17

A. Capteur plan sans vitrage.....	17
B. Capteurs plans vitrés.....	18
C. Capteurs sous vide.....	19
II.3.1.2. Différentes utilisations de la chaleur solaire.....	20
II.3.2. Energie solaire photovoltaïque.....	21
II.3.2.1. Evolution de l'électricité photovoltaïque.....	21
II.3.2.2. Cellule photovoltaïque.....	21
A. Cellules monocristallines.....	21
B. Les cellules polycristallines.....	22
C. Couche mince (Amorphe).....	23
II.3.2.3. Principe de la conversion photovoltaïque.....	24
II.3.2.4. Définition du générateur photovoltaïque.....	25
II.3.2.5. Association en série et en parallèle des cellules photovoltaïques.....	26
A. Mise en série.....	26
B. Mise en parallèle.....	26
II.3.2.6. Protection des modules photovoltaïques.....	26
II.3.2.7. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.....	27
A. Modèle de la cellule solaire.....	27
B. Cellule idéale.....	29
C. Modèle à une diode.....	30
D. Modèle à deux diodes.....	31
II.3.2.9. Influence des paramètres météorologiques.....	33
A. Influence de l'ensoleillement.....	33
B. Influence de la température.....	34
II.3.2.10. Identification des caractéristiques électriques des modules PV.....	35
II.3.2.10. Optimisation du générateur photovoltaïque.....	36
II.3.2.10.1. Adaptation de l'énergie photovoltaïque.....	37
II.3.2.10.2. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).....	38

Chapitre III :Energie éolienne

III.1. Introduction.....	39
III.2. Principe de fonctionnement de l'éolienne.....	39
III.2.1. Transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	39

III.2.2. Multiplication de la vitesse de rotation par la boîte de vitesse.....	30
III.2.3. La génératrice.....	30
III.3. Composition de l'éolienne.....	30
III.4. Coefficient de puissance.....	41
III.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	42
III.6. Types des éoliennes.....	43
III.6.1. Eolienne à axe vertical.....	43
III.6.2. Eolienne à axe horizontale.....	45
III. 7. Eolienne à vitesse variable.....	46
III. 8. Eolienne à vitesse fixe.....	46
III. 9. Fonctionnement autonome.....	46
III. 10. Différents types de machine.....	47
III. 10.1. Machine synchrone à aimants permanents (MSAP).....	47
III. 10.2. Machine synchrone à rotor bobiné.....	47
III. 10.3. Machines asynchrones a cage d'écureuil.....	47
III. 10.4. Machines asynchrones à double alimentation (MADA).....	48
III. 11. Système de régulation de puissance.....	48
III. 11.1. Contrôle par angle de calage variable (pitch control).....	49
III. 11.2. Contrôle par décrochage aérodynamique passif (passive stall).....	49
III. 11.3. contrôle par décrochage aérodynamique actif.....	49

Chapitre IV : Autres sources renouvelables

IV.1. Energie hydraulique.....	50
IV.1.1. Installations à accumulation -Barrages-.....	50
IV.1.2. Energies marines.....	50
IV.1.3. Usines marémotrices.....	51
IV.1.4. Avantages inconvénients.....	51
A. Avantages.....	51
B. Inconvénients.....	52
IV.2. Biomasse.....	52
IV.2.1. Matières organiques.....	52
A. Bois (biomasse sèche).....	52
B. Fumier (biomasse humide).....	52
C. Plantes (biomasse humide).....	52

IV.2.2.Utilisation et installations.....	53
A. Energie-bois (biomasse sèche).....	53
B. Biogaz (biomasse humide).....	53
C. Biocarburants (biomasse humide).....	54
IV.2.3.Avantages et Inconvénients.....	54
A. Avantages.....	54
B. Inconvénients.....	54
IV.3. Energie géothermique.....	54
IV.3.1 Utilisation et installations.....	55
A. Les pompes à chaleur.....	55
B. Les installations hydrothermales.....	55
C. Les installations pétro-thermales.....	55
IV.3.2. Avantages et Inconvénients.....	55
A. Avantages.....	55
B. Inconvénients.....	55
Chapitre V: Stockage, pile à combustibles et hydrogène	
V.1. Les unités de stockage.....	57
V.2. Stockage à long terme.....	57
V.2.1. Batteries.....	57
V.2.2. Stockage sous forme d'air comprimé.....	57
V.2.3. Le stockage par pile à combustible à hydrogène.....	58
V.2.3.1. Définition.....	58
V.2.3.2. Différents types de piles à combustible.....	58
V.2.3.3. Principe de fonctionnement.....	59
V.2.3.4. Eléments de base d'une cellule élémentaire de pile PEM.....	61
A. Plaques bipolaires.....	61
B. Couches de diffusion.....	61
C. Assemblage Membrane - Electrodes.....	62
V.2.3.5. Relation tension / courant.....	62
V.2.3.5. Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM.....	64
A. Avantages.....	64
B. Inconvénients.....	64
V.3. Stockage à court terme.....	65

V.3.1. Volants d'inertie.....	65
V.3.2. Inductance supraconductrice (SMES).....	66
V.3.3. Super-condensateur.....	66

Chapitre I : Introduction aux énergies renouvelables

I.1 Energie

L'énergie est définie en physique comme la capacité d'un système à produire un travail, entraînant un mouvement ou produisant par exemple de la chaleur ou de l'électricité. C'est une grandeur physique qui caractérise l'état d'un système et qui est d'une manière globale conservée au cours des transformations.

Le terme « énergie » est aussi utilisé dans les domaines technologique, économique et écologique, pour évoquer les ressources énergétiques, leur consommation, leur développement, leur épuisement, leur impact écologique.

Les formes principales d'énergie sont :

- ✓ l'énergie thermique, ou chaleur.
- ✓ l'énergie électrique.
- ✓ l'énergie chimique.
- ✓ l'énergie potentielle, due à la gravité.
- ✓ l'énergie cinétique, dans les objets en mouvement.
- ✓ l'énergie nucléaire.

L'unité de mesure de l'énergie est le **Joule**.

Pour mesurer l'énergie en terme de puissance, on utilise souvent les unités suivantes :

- Kilowattheure (kWh) : $1\text{kWh} = 3,6\text{ MJ}$.
- Tonne d'équivalent pétrole (TEP) : $1\text{ TEP} = 42\text{ GJ}$.

On distingue 4 niveaux d'énergie:

- ✓ **L'énergie primaire** : celle disponible dans la nature (Exp : pétrole brut sortant du puits, énergie lumineuse, le vent,...).
- ✓ **L'énergie secondaire** : celle obtenue après transformation de l'énergie primaire (Exp : l'électricité produite dans les centrales électriques, le carburant après raffinage du pétrole brut,...).
- ✓ **L'énergie finale** : celle qui est transportée et distribuée à son utilisateur (Exp : l'essence dans le réservoir, le gaz naturel,...).
- ✓ **L'énergie utile** : celle juste nécessaire à la satisfaction du besoin (Exp : le déplacement en voiture, la cuisson des aliments, l'éclairage)

La majeure partie de l'énergie primaire utilisée dans le monde provient de gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz). Ces gisements, constitués au cours de millions d'années, sont en quantité limitée et donc épuisables.

Les énergies fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, les océans, les marées, les végétaux, la chaleur de la Terre, n'ont pas de réserves limitées et se reforment constamment. Elles sont donc renouvelables.

I.2. Ressources d'énergies fossiles

Ce sont des stocks d'énergie sous forme chimique que la nature a mis des millions d'années à produire. La plus importante de ces sources d'énergie est le pétrole et ses produits dérivés. Dans les pays industrialisés, le gaz naturel s'est largement développé, contrairement au charbon. Pourtant, la boulimie énergétique mondiale et l'épuisement progressif des gisements de pétrole et de gaz naturel engendrent un regain d'intérêt envers le charbon, dont les gisements sont beaucoup plus importants que les deux autres formes d'énergie fossile.

I.2.1. Pétrole

La composition de chaque gisement est unique et dépend de son passé biologique et géologique. On y trouve plusieurs milliers de molécules différentes, essentiellement des hydrocarbures.



Carbone (84 à 87%) - Hydrogène (11 à 14%) - Soufre et Oxygène (0 à 3%) - Azote et Eau (0 à 1%)

Figure. 2. Composition du pétrole

Lorsqu'il sort de terre, le pétrole "brut" est un liquide noir et visqueux qui ne peut pas être utilisé tel quel. Les raffineries sont les usines dans lesquelles on distille le pétrole. Le pétrole va être chauffé jusqu'à ce que les différentes substances qui le composent se séparent les unes des autres. Les plus lourdes restent au fond de la cuve, tandis que les plus légères s'évaporent.

Au fond de la cuve on trouve les matières les plus denses qui sont transformées en bitume ou en fioul. Celles qui sont situées au-dessus sont transformées en carburants (diesel, kérosène ou l'essence). Enfin, le pétrole ainsi raffiné produit aussi des gaz (propane et butane), qui servent notamment au chauffage, ou alimentent les cuisinières à gaz.

I.2.2. Gaz naturel

Le gaz naturel est principalement constitué de méthane, un gaz qui se dégage des organismes vivants lorsqu'ils se décomposent. Comment se fait-il qu'on en trouve sous terre? Comme le pétrole et le charbon, le gaz naturel trouve son origine dans la décomposition d'animaux et de végétaux morts depuis des millions d'années !

Le gaz naturel n'a presque pas besoin d'être transformé, on peut l'utiliser quasiment tel quel, pour produire du chauffage ou de l'électricité. On l'achemine à l'endroit où il sera utilisé par des tuyaux appelés "gazoducs", ou dans des bateaux appelés "méthaniers".

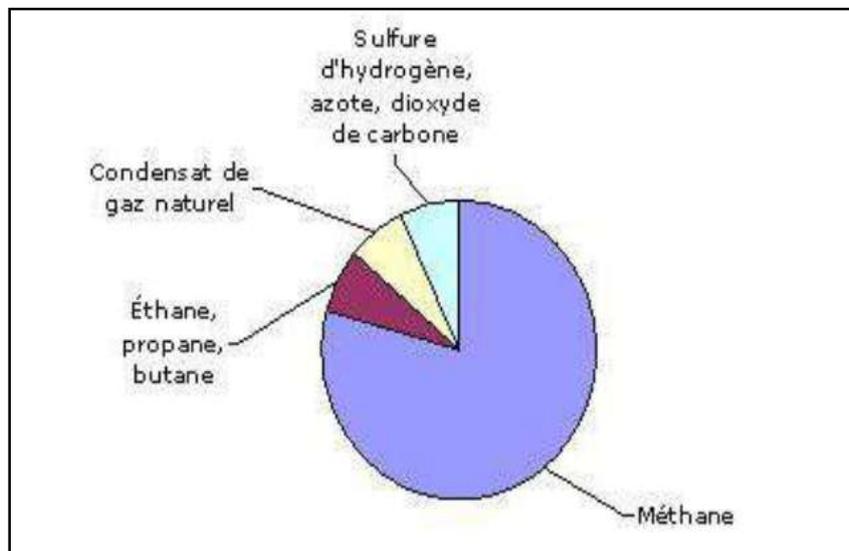
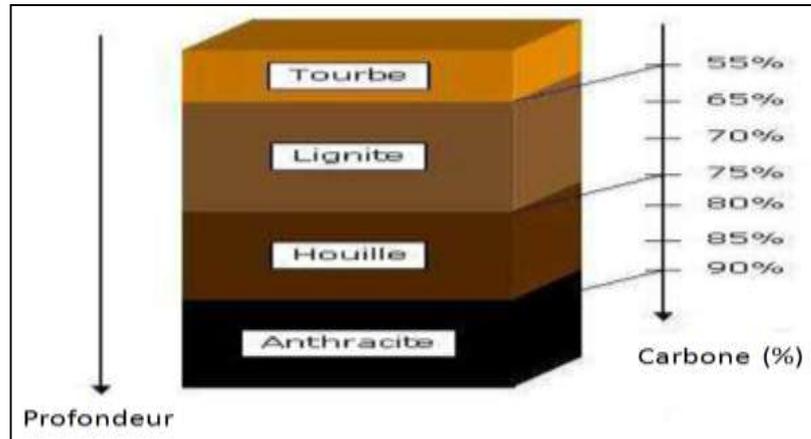


Figure.3. Constitution du gaz naturel brut

I.2.3. Charbon

L'enfouissement rapide d'arbres et de débris végétaux au sein de certains bassins sédimentaires provoque la lente et progressive formation du charbon, avec des passages successifs par la tourbe, le lignite,

la houille et l'anhracite, qui est du carbone presque pur. Exploité depuis des siècles, le charbon est extrait dans des mines sous terre ou à ciel ouvert.



Tourbe(50 à 55%) - Lignite (55 à 75%) - Houille (75 à 90%) - Anthracite (> 95%)

Figure.1. Formation du charbon

I.2.4. Avantages et inconvénients

A. Avantages

- Technologie bien maîtrisée;
- Bon rendement;
- Disponible toute l'année;
- Facilement stockable et déplaçable.

B. Inconvénients

- Non renouvelable;
- Ressources limitées;
- Très polluant.

I.3. Energie Nucléaire

L'énergie atomique, ou l'énergie nucléaire utilise l'uranium, un métal radioactif, comme combustible pour produire de l'électricité.

L'uranium est la matière première des centrales nucléaires. Il s'agit d'un métal, que l'on trouve dans certaines roches, et qui a la particularité d'être radioactif. Cela signifie que le noyau de ses atomes est

instable et a tendance à se désintégrer. Ce phénomène naturel, même s'il se déroule à une échelle si petite qu'on ne peut même pas le voir au microscope, libère une très grande quantité d'énergie.

L'énergie nucléaire, ou "énergie atomique" est libérée lorsque les noyaux des atomes se cassent. On parle de "fission nucléaire". C'est ce phénomène que l'on utilise dans un réacteur nucléaire. Mais l'énergie contenue dans certaines matières peut aussi être libérée lorsque les noyaux de leurs atomes fusionnent. On parle alors de "fusion nucléaire". À l'heure actuelle, on ne sait pas reproduire ce phénomène pour le rendre utilisable. En revanche, on sait que l'énergie produite dans ces conditions est bien plus puissante que la fission, car c'est la fusion nucléaire qui fait brûler les étoiles comme notre soleil.

I.3.1. Utilisation et installations

A. Mines d'uranium

Les roches qui contiennent du minerai d'uranium sont extraites du sous-sol terrestre dans des mines d'uranium. Mais pour pouvoir être utilisé comme source d'énergie, l'uranium doit d'abord être transformé en usine, pour en faire une sorte de concentré appelé "yellowcake" (gâteau jaune).

B. Centrales nucléaires

Le « yellowcake », est acheminé dans les centrales. Il est alors enfermé, de manière hermétique, dans le réacteur nucléaire. C'est celui-ci qui va provoquer la désintégration des noyaux atomiques d'uranium. Ce processus dégage une formidable énergie sous forme de chaleur, qui sert à faire bouillir de l'eau. La vapeur fait tourner une turbine qui produit de l'électricité. D'ailleurs, la fumée que l'on voit s'élever au-dessus des grandes cheminées rondes des centrales... ce n'est pas du CO₂ ou de la pollution, mais justement de la vapeur d'eau. La seule atteinte directe à l'environnement, c'est que l'eau qui sert à refroidir les installations retourne chaude dans la nature. Cela peut perturber les végétaux et les animaux. Aujourd'hui, il existe 450 centrales nucléaires réparties dans 31 pays. Ensemble, elles produisent environ 11% de l'énergie consommée dans le monde. Les pays qui produisent le plus d'énergie nucléaire sont les États-Unis, avec 98 réacteurs, et la France, qui en compte 58. Dans le monde, 55 centrales nucléaires sont en cours de construction, dont 12 en Chine. Notons au passage que, depuis sa découverte, le principe de la radioactivité a trouvé des applications très utiles dans la médecine; Les rayons X, par exemple, permettent de faire des photographies des parties dures à l'intérieur du corps.

C. Les déchets radioactifs

Une fois que l'uranium a été utilisé, il reste une matière qui ne peut plus alimenter le réacteur, mais qui est radioactive. Ainsi, en sortant des centrales, ces déchets nucléaires passent par une usine de traitement, où

ils sont triés en fonction de leur degré de radioactivité. Puis ils sont stockés ou enterrés le plus profondément possible, dans des conteneurs hermétiques.



Figure.4. Centrale nucléaire

I.3.2. Avantages et inconvénients

A. Avantages

- Grande puissance;
- Pas d'émission de CO₂;
- Disponible toute l'année;
- Pas cher à produire;
- Installation de moyenne durée (40 ans).

B. Inconvénients

- Rendement faible (30%);
- Conséquences en cas d'accident (radioactivité);
- Problème de gestion des déchets nucléaires;
- Coûts d'installation, d'entretien et de démantèlement (lorsque les centrales sont trop vieilles);
- Ressources en uranium limitées.

I.4. Sources d'énergie renouvelables

Comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain ! Les énergies renouvelables sont caractérisées par une faible densité d'énergie, des difficultés de stockage, un usage non polluant, une bonne disponibilité géographique, et des réserves virtuellement inépuisables.

Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse.

I.4.1. Energie solaire

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter ! Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement.

A. Avantages

- Énergie renouvelable ;
- Disponible toute l'année;
- Facile à installer;
- Technologie qui évolue rapidement.

B. Inconvénients

- Rendement faible (15%);
- Fabrication et recyclage des panneaux peu écologiques, car nécessite de l'énergie;
- Production qui dépend des conditions d'ensoleillement;
- Durée de vie limitée (env. 20 ans avec un rendement maximum).

I.4.2. Energie éolienne

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le transforment en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante.

A. Avantages

- Énergie renouvelable ;
- Disponible toute l'année;
- Installation démontable;

- Technologie bien maîtrisée;
- Sans déchet et sans risque majeur.

B. Inconvénients

- Impact sur le paysage;
- Fonctionne seulement si le vent souffle;
- Installation à durée de vie limitée (20-30 ans);
- Rendement moyen (20-60%).

I.4.3. Energie hydraulique

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.

I.4.4. Energie biomasse

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments ! Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante, grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes ! La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz.

I.4.5. Energie géothermique

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles

grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur, par exemple.

Chapitre II: Energie solaire

II.1. Introduction

La première énergie disponible en grande quantité sur la surface terrestre est l'énergie solaire, caractérisée par l'ensoleillement qui donne l'énergie fournie par le soleil par unité de surface sur une période donnée, en J/m^2 , et par l'irradiation solaire qui correspond à la puissance à un instant donné, en W/m^2 .

II.2. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol dépend de :

- L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- La latitude du lieu, de son degré de pollution ainsi que de son altitude,
- La période de l'année,
- L'instant considéré dans la journée,
- La nature des couches nuageuses.

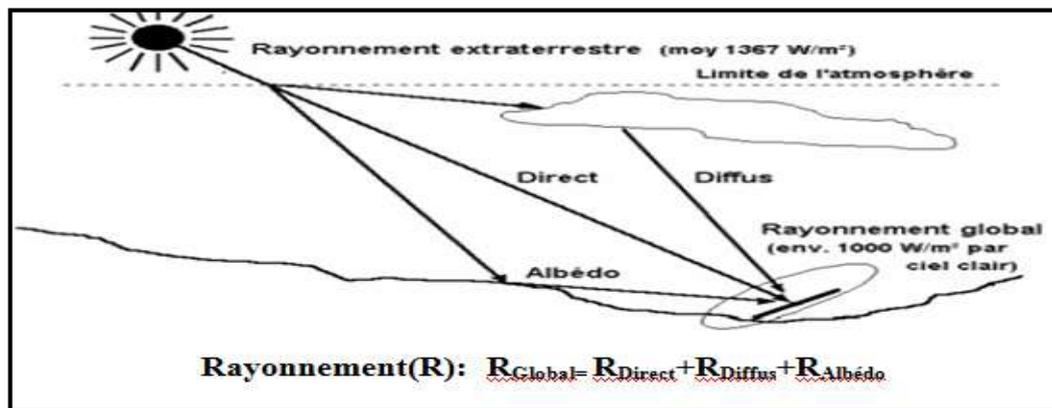


Figure 1. Composant du rayonnement solaire au sol.

L'éclairement solaire sur un plan d'une inclinaison donnée est composé de grandeurs suivantes :

- **Eclairement direct** : C'est le rayonnement solaire reçu directement du Soleil.
- **Eclairement diffus** : C'est le rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages.
- **Eclairement réfléchi** : C'est le rayonnement solaire qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo, du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neige, eau, etc.).

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} , qui répond elle-même à la relation suivante :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda}$$

Dans laquelle 'λ' représente la longueur d'onde, 'h' = 6,62 · 10⁻³⁴ J.s la constante de Planck et 'c' la vitesse de la lumière.

II.3. Energie solaire

Transformation de l'énergie solaire en électricité ou en chaleur à partir de panneaux ou de capteurs solaires. Le soleil, principale source des différentes formes d'énergie, renouvelables disponibles sur terre.

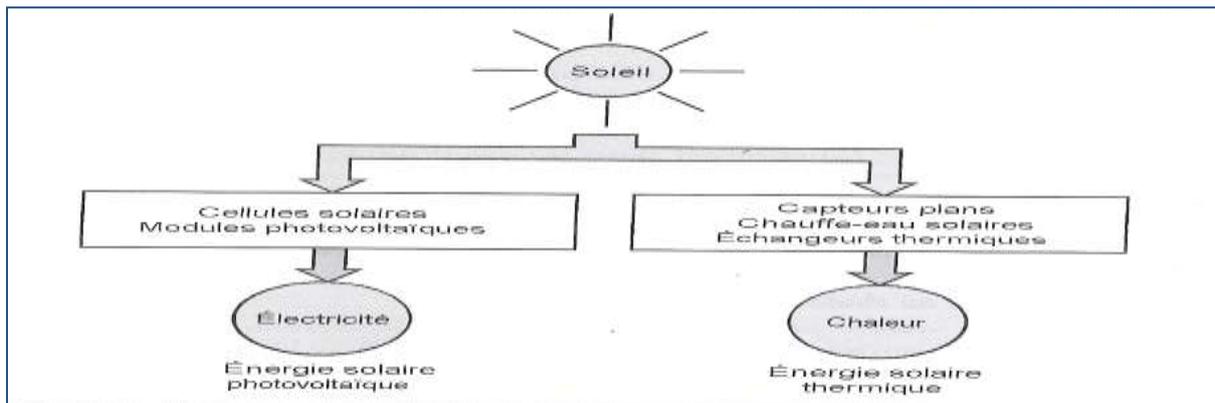


Figure 2. Les deux formes de l'énergie solaire

II.3.1. Energie solaire thermique

Les capteurs solaires thermiques constituent le cœur des installations destinées à transformer l'énergie transmise par le soleil en chaleur. Le rayonnement solaire est absorbé par une surface noire, parcourue par un fluide caloporteur qui extrait l'énergie thermique et la transfère vers son lieu d'utilisation ou de stockage. Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les déperditions par conduction. Différentes configurations conduisent à des types de capteurs distincts, dont les performances varient en fonction des domaines d'utilisation.

II.3.1.1. Les différentes technologies des capteurs solaires thermiques

A. Capteur plan sans vitrage

Egalement appelé « capteur moquette », il s'agit d'un seul absorbeur en matière synthétique pour les applications à basse températures en métal revêtu d'une couche sélective, se compose d'un réseau de tubes noirs accolés les uns aux autres. Le rendement du capteur moquette est très bon pour produire des températures proches de la température de l'air ambiant.

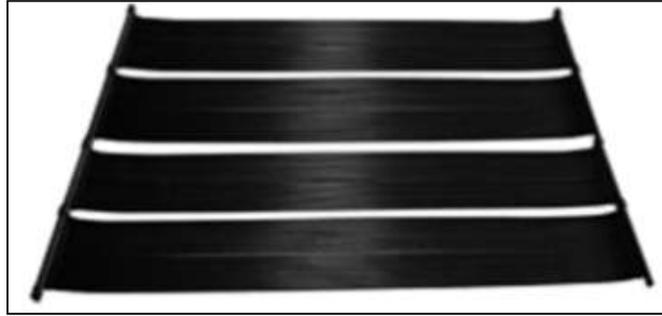


Figure 3. Capteur plan non vitré

B. Capteurs plans vitrés

C'est les capteurs munis d'une couverture transparente, ils sont les plus utilisés . Les principaux éléments constituant un capteur plan sont :

- **Le coffre (ou boîtier) :** Il assure la protection à l'arrière du capteur et participe à sa rigidité. Les matériaux les plus utilisés, pour constituer le fond du coffre, sont le métal (tôle d'acier pré laquée ou aluminium) et les matériaux plastiques [ABS(poly(Acrylonitrile-Butadiène-Styrène)), polyester). Ils doivent présenter les caractéristiques suivantes : bonne tenue à la corrosion, faible prix de revient, transformation facile.
- **L'absorbeur :** C'est le composant qui permet de transformer le rayonnement solaire en chaleur et de transférer l'énergie thermique ainsi produite à un fluide caloporteur. Le matériau le plus utilisé est le cuivre, car il possède une bonne tenue à la corrosion et sa conductivité thermique est élevée.

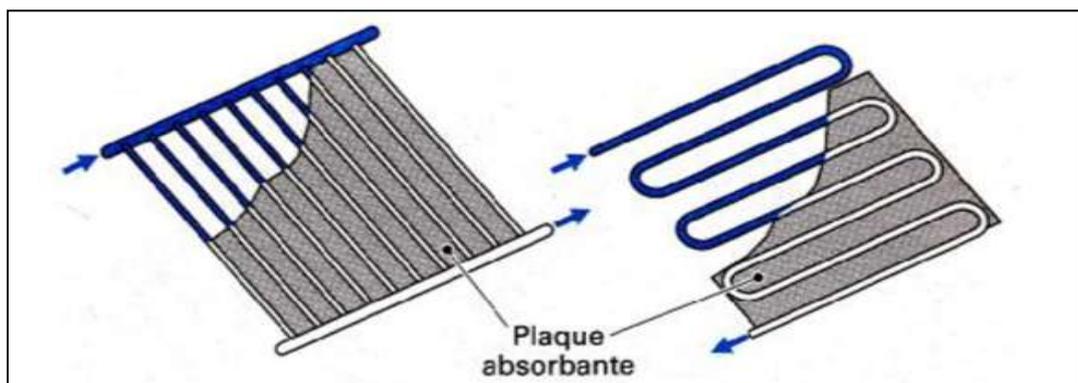


Figure 4. Absorbeurs sous forme d'échelle et de serpentin

- **Un circuit de fluide caloporteur:** La chaleur absorbée est véhiculée par le bief de fluide caloporteur, qui est généralement de l'eau (eau glycolée pour éviter le gel) ou de l'air. Ce fluide circule soit dans une canalisation, canaux ou nappes.

- **Un isolant thermique sur la face arrière:** Elle nécessaire a fin d'éviter les déperditions par conduction (à l'arrière et sur les parties latérale de l'enveloppe du capteur). La mousse de polyuréthane est fréquemment utilisée, combiné parfois avec une couche de laine minérale en contact avec l'absorbeur. Pour des températures élevés on utilise que les mousses phénolique, peu courantes et chères, et les laines minérales (laine de verre et surtout laine de roche qui présente l'avantage de ne pas absorber l'humidité).
- **La couverture transparente (vitrage):** Elle a la double fonction de passer le maximum de rayonnement solaire et d'éviter le refroidissement de l'absorbeur, en réduisant les phénomènes de convection de l'air et en bloquant le rayonnement infrarouge (effet de serre). Les matériaux les plus utilisés sont le verre trempé (pour réduire les risques d'accident en cas de bris). On notera également l'utilisation de vitrage à basse teneur en oxyde de fer, ces vitrages présentent des caractéristiques optiques légèrement supérieures aux vitrages standards. L'espace entre la couverture transparente et l'absorbeur se situe dans une fourchette de 25 à 40 mm. Un espace plus important favoriserait les pertes thermiques par effet de convection.

C. Capteurs sous vide

L'utilisation de ce type est très favorable dans le cas ou la température de fonctionnement requise est très élevée ($>100^{\circ}\text{C}$), ou lorsque la température ambiante est faible (région de montagne). On distingue deux types :

- **Tubes sous vide à flux direct :** Il est constitué d'une série de tubes de verre dans lesquels passe un autre tube collecteur de chaleur. La paroi des tubes est double, comme celle d'une bouteille thermos, et on y fait le vide afin de limiter les pertes thermiques par convection. L'effet thermos obtenu permet d'obtenir un meilleur rendement. On notera aussi que les pertes de puissances par convection et conduction sont quatre fois moins que pour un capteur plan dans les mêmes conditions de température extérieure.

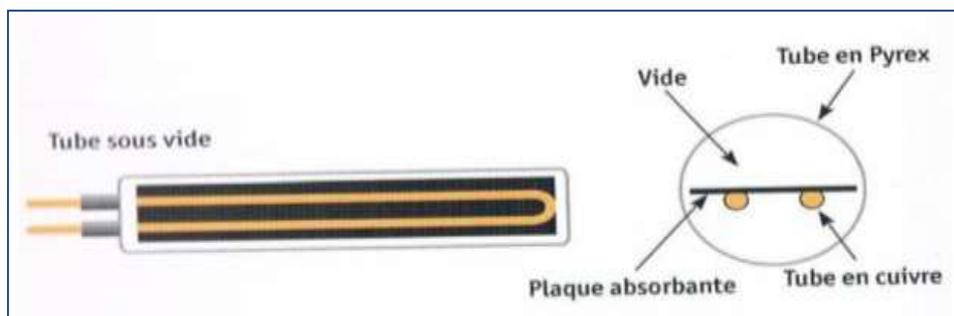


Figure 5. Principe du capteur sous vide à flux direct.

- **Tubes sous vide à caloduc:** Dans les tubes sous vide à caloduc, le tube de l'absorbeur contient une petite quantité de liquide (fluide organique, alcool...). Sous l'action du rayonnement solaire, le liquide se transforme en vapeur qui monte en haut du tube où elle se condense au contact de l'échangeur et transfère la chaleur au fluide caloporteur. Les tubes doivent impérativement être inclinés. Le principal avantage d'un système à caloduc en regard du précédent est de pouvoir remplacer un tube défectueux sans avoir à démonter l'ensemble du capteur. D'un point de vue thermique, les capteurs sous vide ont l'avantage de pouvoir monter en température rapidement, ainsi qu'un très bon rendement. Bien qu'ils soient plus chers à l'achat, leur domaine d'application est plus large, surtout la possibilité de produire du froid par absorption.

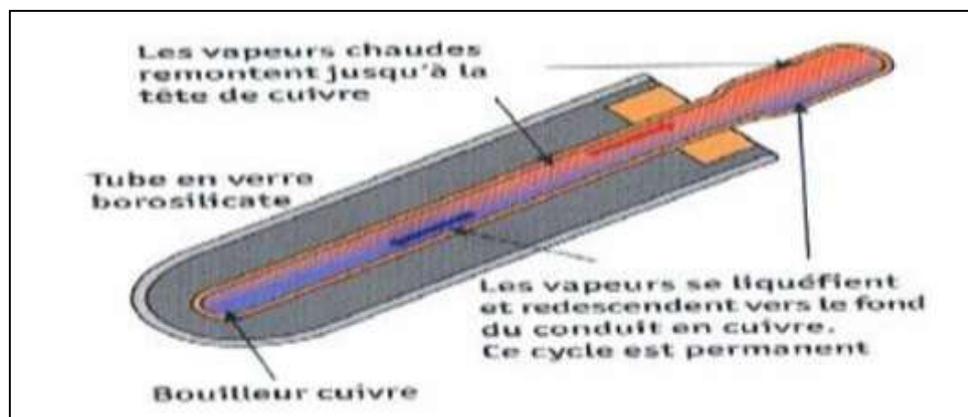


Figure 6. Principe d'un capteur sous vide à caloduc.

II.3.1.2. Différentes utilisations de la chaleur solaire

La chaleur solaire a été captée, acheminée, et peut désormais être utilisée. Il existe trois utilisations générales de l'énergie thermique, chaque utilisation nécessitant une gamme de température à atteindre.

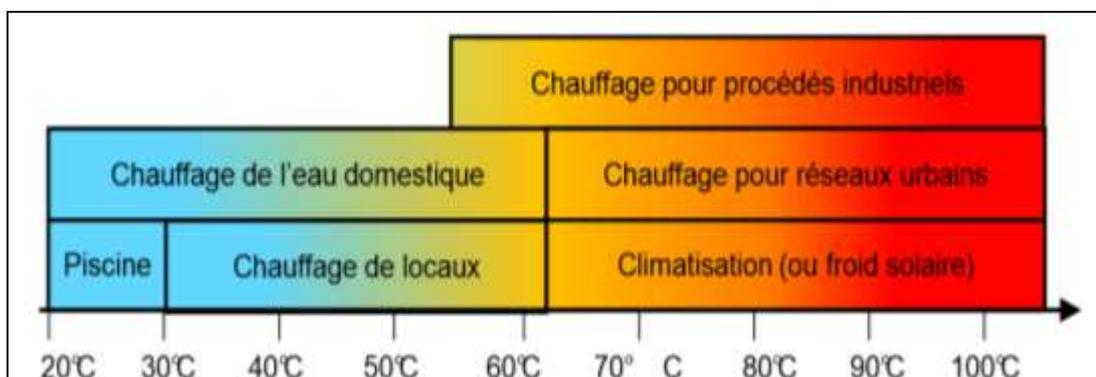


Figure 7. Utilisations possibles de la chaleur solaire

II.3.2. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation.

II.3.2.1. Evolution de l'électricité photovoltaïque

Bien que les bases théoriques de l'effet photovoltaïque fussent connues depuis le début du siècle, ce n'est qu'à partir de 1954, dans les laboratoires de la Bell Téléphone à New Jersey, que la première cellule ayant un rendement raisonnable a été mise au point. Depuis la deuxième moitié du siècle précédent, le processus de purification de monocristaux de silicium a émergé.

En 1956 Loferski publiait différentes tables de conversion de rendement photovoltaïque pour tous les matériaux semi-conducteurs. Puis, c'est au début des années 70 que l'on a pu obtenir en laboratoire un rendement de 20 % en travaillant sur des cellules de monocristal d'arsenic de gallium (GaAs). Le rendement est sensiblement inférieur lorsque ces cellules se font à l'échelle industrielle.

Aussi, des expériences ont été faites avec des cellules composées de deux couches :

- Une de sulfure de cadmium (SCd) .
- Une autre de sulfure de cuivre (SCu₂).

Ces cellules présentent l'avantage d'utiliser très peu de matière active et permettent un processus de fabrication plus simple. Cependant, leur faible rendement ne permet pas de les utiliser à l'échelle industrielle.

La commercialisation de cellules solaires photovoltaïques a commencé dès l'apparition du silicium monocristallin et elles occupent encore la première place du marché. Plus tard, apparurent les matériaux polycristallins, de fabrication plus économique, mais présentant encore de faibles rendements.

Récemment des cellules de silicium amorphe se sont commercialisées et utilisées pour des dispositifs de très faible puissance : calculettes, montres, radio portable, etc....

II.3.2.2. Cellule photovoltaïque

Cellule solaire et photopile sont des termes équivalents qui désignent généralement des capteurs de petite taille, utilisés soit tels quels, soit en assemblage dans un panneau solaire, ou module photovoltaïque.

A. Cellules monocristallines

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie.

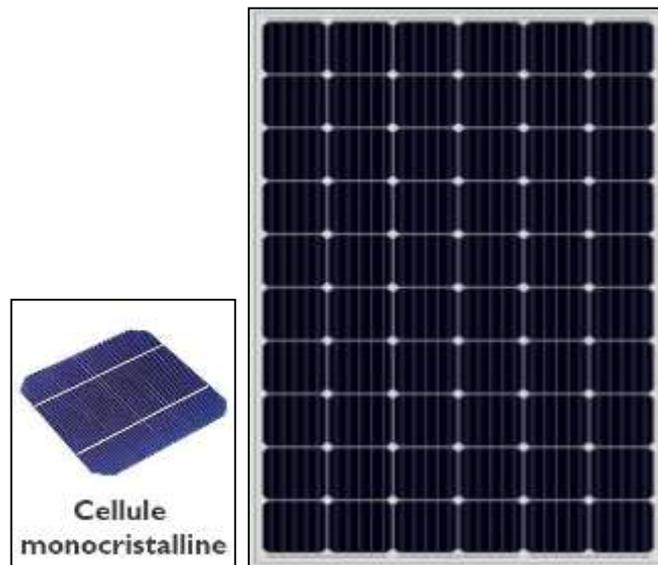


Figure 8. Les cellules monocristallines

Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%.

B. Les cellules polycristallines

Les panneaux PV avec des cellules poly cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Durée de vie estimée : 30 ans.

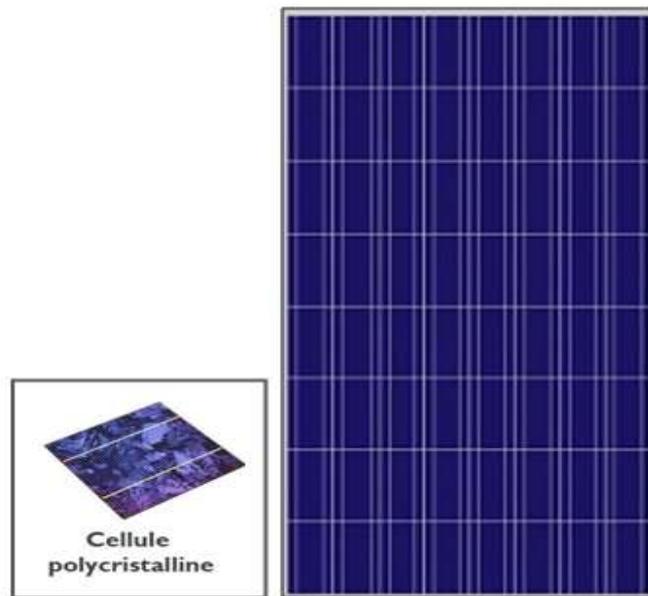


Figure 9. Les cellules polycristallines.

Un cristal est un solide avec des façades polygonales, plus ou moins brillant, à structure régulière et périodique, formée d'un empilement (un cumule) ordonné d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions.

C. Couche mince (Amorphe)

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal.



Figure 10. Les cellules Couche mince (Amorphe).

Le rendement de ces panneaux (6 à 8%) est moins bon que celui des technologies poly-cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.

II.3.2.3. Principe de la conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée.

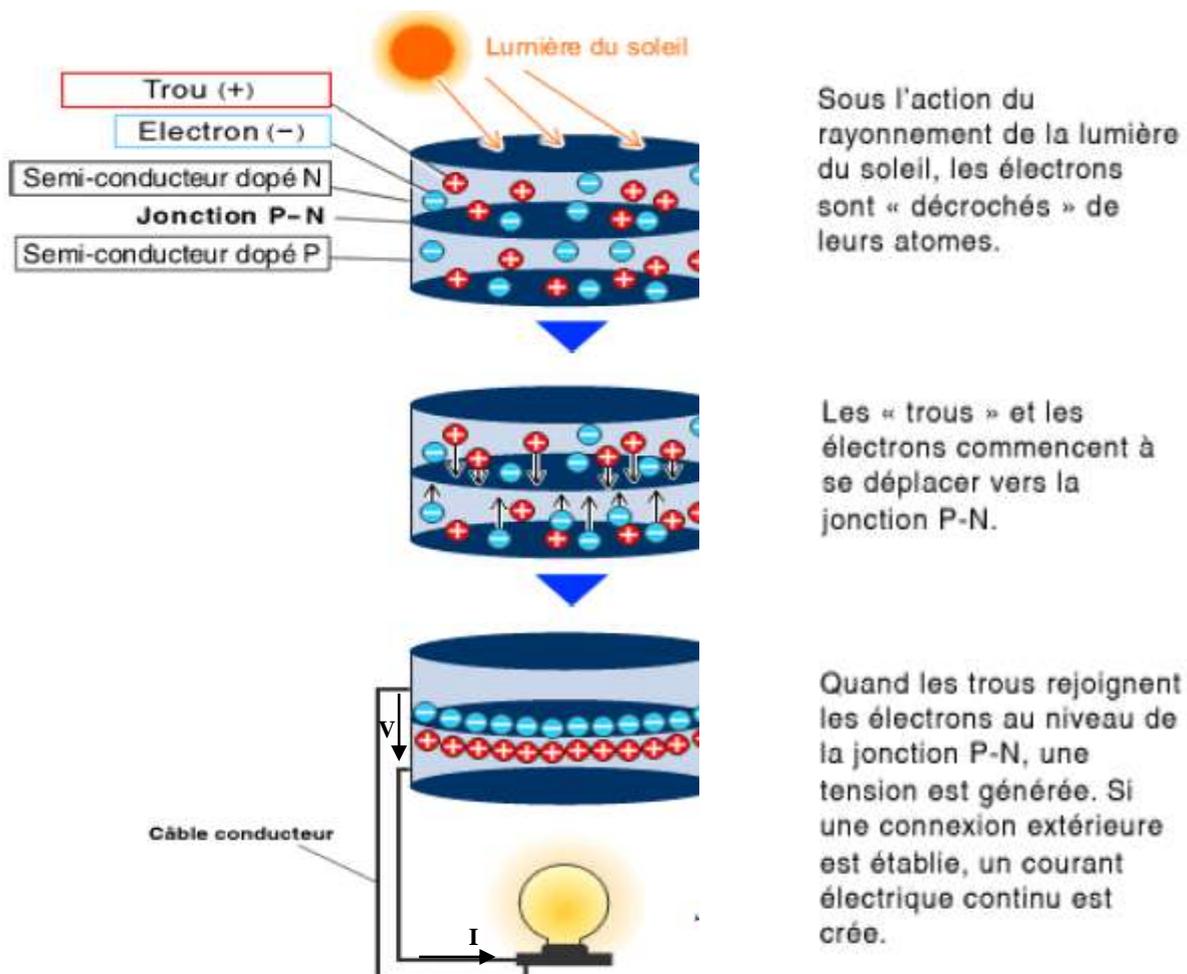


Figure 11.Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

II.3.2.4. Définition du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules assemblés en série et en parallèle selon la puissance demandée. Chaque module est lui-même constitué de cellules photovoltaïques généralement montées en série.

Une cellule photovoltaïque ne produit qu'une très faible puissance électrique, de 1 à 3 W, avec une tension de moins d'un volt. Afin de produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. 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. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnels à la surface du module.

De plus, la structure du module protège les cellules photovoltaïques contre les agressions de leur environnement telles que le bris et la corrosion. Généralement, les cellules sont encapsulées sous verre ou sous composé plastique pour former le module photovoltaïque.

L'interconnexion des modules (en série ou/et en parallèle) permet de produire une puissance encore plus grande et elle définit la notion du générateur photovoltaïque. La diversité des cellules photovoltaïques du point de vue forme et technologie de fabrication conduit forcément aux formats différents du module photovoltaïque.

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaitées. Ainsi, pour (n_s) cellules en série, constituant des branches elles-mêmes (n_p) en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = n_s * V_{pv} * n_p * I_{pv}$$

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (n_s , n_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_m . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{mpp} et d'un courant optimal noté I_{mpp} .

Pour réduire les dysfonctionnements, les fabricants ont choisi de ne pas commercialiser des cellules PV seules. Ainsi, les générateurs PV se trouvent souvent sous forme de modules pré câblés, constitués de plusieurs cellules, aussi appelés par abus de langage panneaux PV. Chaque référence de module a ses propres caractéristiques électriques garanties à $10 \pm \%$ selon le lot de fabrication.

II.3.2.5. Association en série et en parallèle des cellules photovoltaïques

A. Mise en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

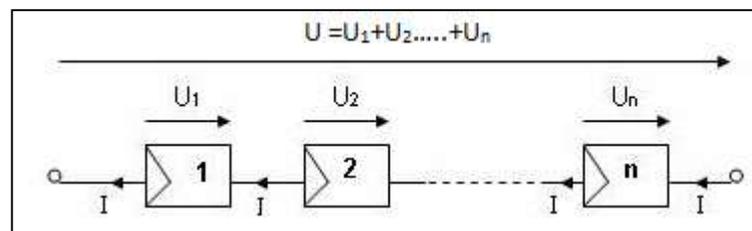


Figure 12. Association en série.

B. Mise en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de Courants à tension donnée.

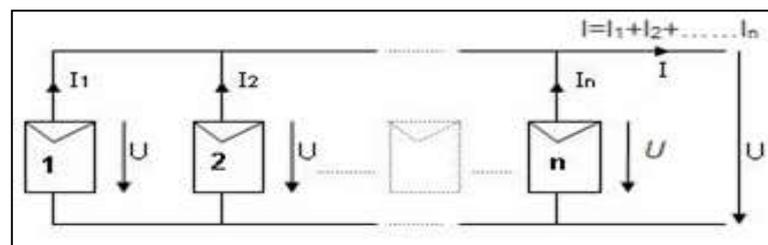


Figure 13. Association en parallèle.

II.3.2.6. Protection des modules photovoltaïques

Il faut faire attention à ce que toutes les photopiles soient éclairées de la même façon. En effet, une photopile ombragée (même partiellement) voit sa tension et surtout son intensité baisser considérablement. Une perte de puissance risque de provoquer une polarisation inverse avec dissipation d'énergie dans la diode défaillante. Pour limiter la perte de puissance, on utilise une diode by-pass qui se place en dérivation d'un groupe de cellule pour ne pas limiter le courant en situation de déséquilibre. De

même, si tout le module est à l'ombre, une batterie bien chargée pourrait débiter dans celui-ci, ce qui serait dangereux pour la structure des photodiodes quasiment incapables de dissiper de l'énergie. On introduit une diode anti-retour sur la borne + du module pour être à l'abri d'un tel ennui. Les diodes anti-retour et by-pass provoquent une chute de potentiel de 0,6V environ qu'il faut prendre en compte dans le rendement des modules.

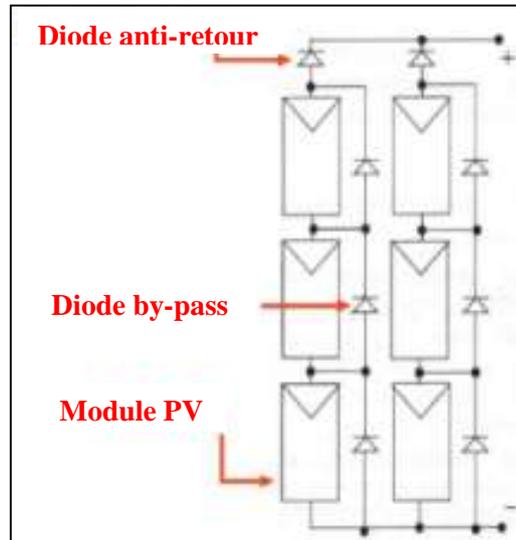


Figure 14. Protection des modules photovoltaïque.

II.3.2.7. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

Dans le cadre de l'optimisation du générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie soutirée, on doit adapter la caractéristique non linéaire I-V du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque.

A. Modèle de la cellule solaire

La cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La modélisation du comportement électrique du module photovoltaïque peut être étendue au générateur photovoltaïque selon sa configuration, nombre de modules en série et en parallèle.

- **Le courant de court-circuit I_{cc}**

Il définit la quantité des paires électron-trou créé et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement.

$$I_{cc} = qG(L_n + L_p)$$

I_{cc} : Courant de court circuit de la cellule.

- **La tension en circuit ouvert V_{oc}**

C'est la tension pour laquelle la diode à l'obscurité, fournit un courant égal au courant de court circuit I_{cc} . Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$V_{oc} = V_{th} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s}\right)$$

$$V_{th} = \frac{AKT_c}{q}$$

I_s : Courant de saturation de la diode

V_{th} : Tension thermique.

A : Coefficient d'idéalité de la diode.

q : Charge d'un électron $1.6 \cdot 10^{-19}$.

T_c : Température de la jonction.

k : Constante de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23} (J / K)$.

- **Le facteur de forme FF**

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est obtenu comme suit :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}}$$

V_m : Tension de point de puissance maximale (V).

I_m : Courant de point de puissance maximale (A).

- **Point de puissance maximale**

Est le point (V_m , I_m) où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P_m = V_m \cdot I_m$$

- **La puissance du flux lumineux incident**

$$P_{in} = S \cdot E$$

E : L'ensoleillement qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m²).

S : La surface effective des cellules.

- **Température de jonction**

La température de la jonction T_c de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} E$$

Avec :

NOCT : La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

T_a : La température ambiante.

- **Le rendement de conversion d'énergie η**

C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire Incident

$$\eta = FF \frac{I_{cc} V_m}{P_{in}} \quad \text{où} \quad \eta = \frac{I_m V_m}{S.E}$$

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant finals du générateur photovoltaïque.

B. Cellule idéale

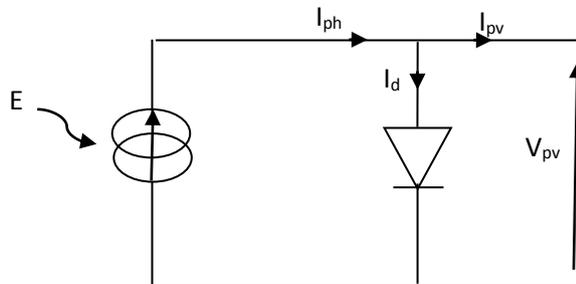


Figure 15. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} + I_d$$

$$I_d = I_s e^{\left(\frac{qV}{AKT_c} - 1\right)}$$

I : Courant disponible

I_{ph} : Courant produit par la photopile

V : Tension aux bornes de la cellule

$$\frac{KT}{q} = 26\text{mV à } T_c=300 \text{ °K pour le silicium poly-cristallin.}$$

I_s : Courant de polarisation de la diode ou courant de saturation.

C. Modèle à une diode

Le modèle à une diode est le plus utilisé et il donne de très bonnes précisions. La conversion de l'énergie de la lumière en énergie électrique est modélisée par un générateur de courant.

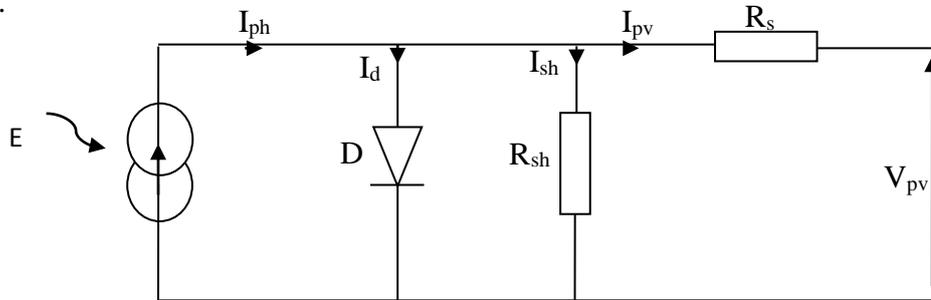


Figure 16. Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

➤ Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh}$$

Tel que :

I_{pv} : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

➤ Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{ph} = P_1 E \left[1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right]$$

La température du module est donnée par : $T_c = T + E [(Noct - 20) / 800]$

Tel que :

E_{ref} : Ensoleillement de référence

T_c : Température absolue de la cellule

T_{cref} : Température de référence

T : Température ambiante.

E : Ensoleillement dans les condition de fonctionnement.

$Noct$: Température nominale de fonctionnement du module, donnée par le constructeur.

- Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s e^{\frac{q(V+R_s I_{pv})}{An_s K T_j} - 1}$$

Avec :

$$I_s = P_4 T_c^3 e^{\left(\frac{E_g}{K T_c}\right)}$$

Avec :

$$E_g = 1.1 eV$$

E_g : L'énergie de gap (paramètre caractéristique du matériau, pour le Silicium).

I_s : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité.

- Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{(v + R_s I_{pv})}{R_{sh}}$$

Tel que :

R_s : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contacte).

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

D'ou l'expression de la caractéristique courant-tension (I-V) qui est donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = P_1 E \left[1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - P_4 T_c^3 e^{\left(\frac{E_g}{K T_c}\right)} e^{\left(\frac{q(V+R_s I)}{AK T_c} - 1\right)}$$

Avec : P_1 , P_2 , P_3 et P_4 sont des paramètres déterminés par la résolution numérique (Newton Raphson, Moindres Carrés, ...).

D. Modèle à deux diodes

Ce modèle est représenté par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant modélisent le flux lumineux, les pertes sont modélisé par deux résistances, une résistance

shunt R_{sh} , une résistance série R_s et deux diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires.

L'avantage de ce modèle c'est qu'il est établi en appliquant seulement des données standard.

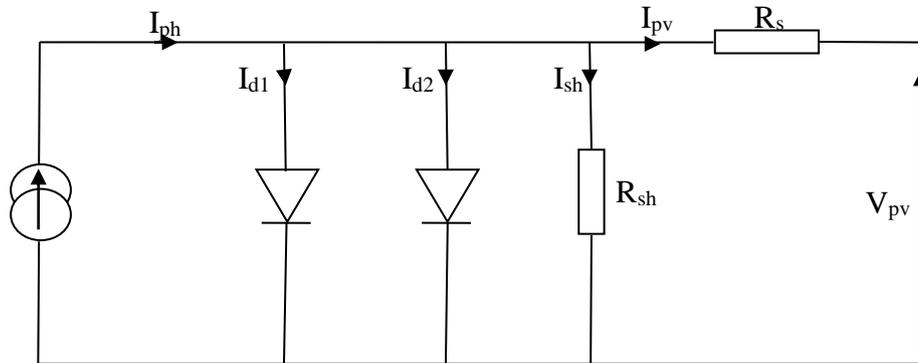


Figure 17. Schéma électrique équivalent du modèle deux diodes.

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff

$$I_{pv} = P_1 E \left[1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref}) \right] - P_4 T_c^3 e^{\left(\frac{-E_g}{KT_c} \right)} e^{\left(q \frac{V + R_s I_{pv}}{A n_s K T_c} \right)^{-1}} - P_5 T_c^3 e^{\left(\frac{-E_g}{2KT_c} \right)} e^{\left(q \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{2 A n_s K T_c} \right)^{-1}} - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}}$$

II.3.2.8. Caractéristiques de module photovoltaïque :

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation. La figure (18) représente les caractéristiques courant-tension $I_{pv} = f(V_{pv})$ et puissance-tension $P_{pv} = f(V_{pv})$ du module SHARP NT175E1 (175 WC) dans les conditions standards de fonctionnement donnée ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_c = 25^\circ\text{C}$).

Le tableau suivant donne les paramètres électriques de panneaux utilisés dans les conditions standards :

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau P_m	175 W
Courant au point de puissance max I_m	4.95A
Tension au point de puissance max V_m	35.4V
Courant de court-circuit I_{cc}	5.4A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	44.4V
Coefficient d'incrément du courant $I_{cc} (\alpha_{cc})$	0.053 mA/°C
Coefficient d'incrément de la tension $V_{oc} (\beta_{oc})$	-156 mV/°C

Tableau 1. Paramètres électriques du panneau SHARP NT175E1 (175 WC).

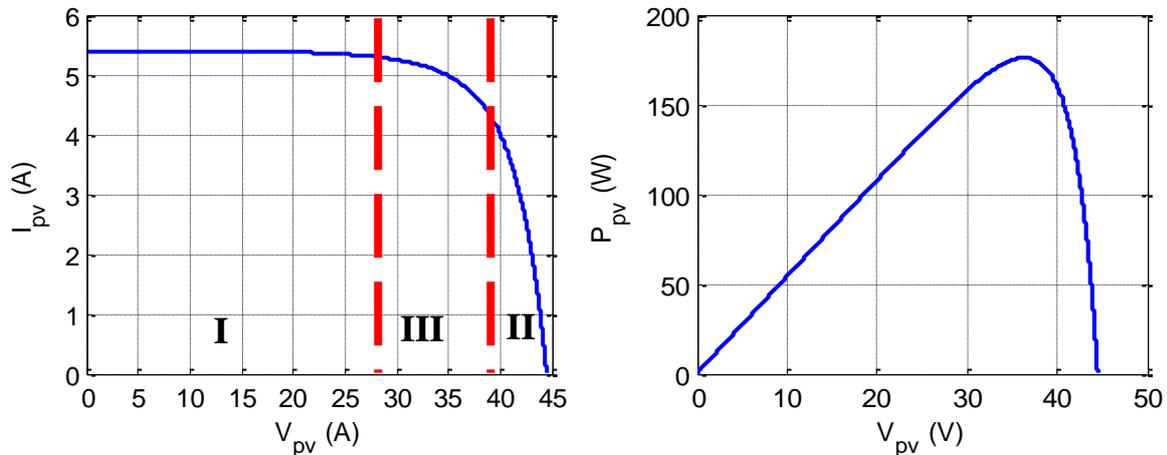


Figure 18. Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ ($E = 1000 \text{ W/m}^2, T_c = 25^\circ\text{C}$)

On remarque d'après La caractéristique (courant-tension) que le module photovoltaïque possède trois zones de fonctionnement qui sont :

La zone (I) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant

La zone (II) : 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.

La zone (III) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du panneau PV, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

II.3.2.9. Influence des paramètres météorologiques

Les caractéristiques du module PV du panneau SHARP NT175E1 (175 WC).

A. Influence de l'ensoleillement

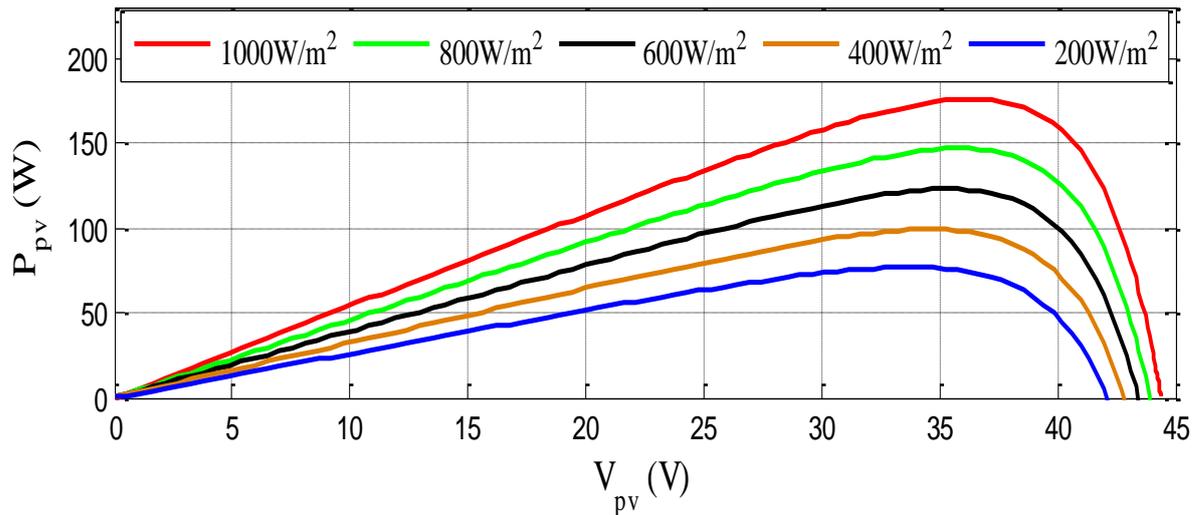


Figure 19. Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.

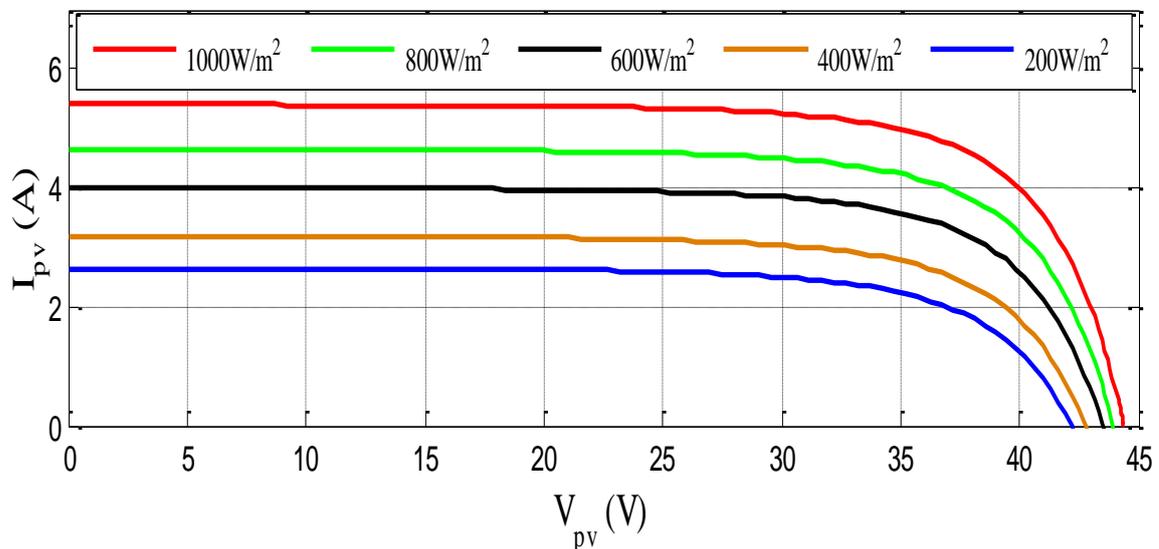


Figure 20. Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

Pour une température de 25 °C est maintenue constante, l'ensoleillement (E) varie. Les courbes obtenues sont illustrées dans les figures (19 et 20).

On remarque :

- ✓ Que l'influence due à la baisse de l'éclairement fait diminuer fortement la valeur du courant de court-circuit I_{cc} . Par contre la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue faiblement.
- ✓ Que le point de puissance optimale chute brusquement si l'ensoleillement diminue.
- ✓ Que le courant produit par la photopile I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire E. Par contre, la tension aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même .

B. Influence de la température

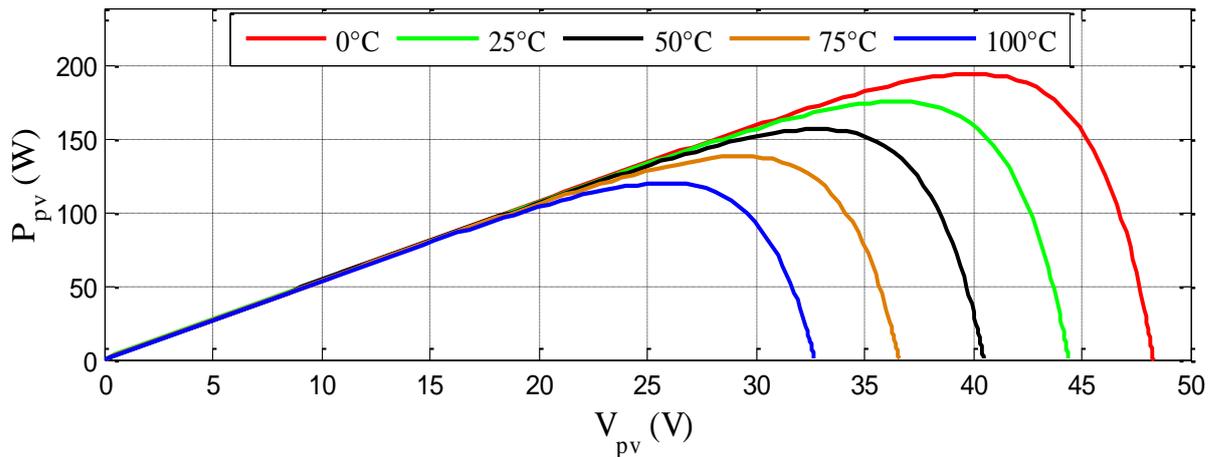


Figure 21. Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.

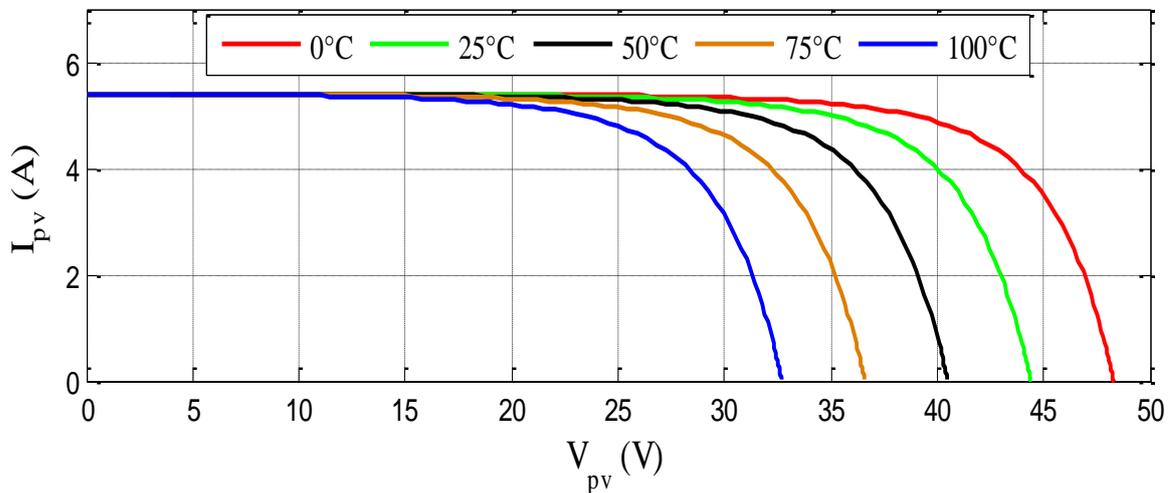


Figure 22. Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

Pour un ensoleillement 1000W/m^2 maintenu constant, Les courbes obtenues sont illustrées dans les figures (21 et 22).

On remarque :

- ✓ Que le courant de court-circuit I_{cc} est faiblement dépendant de la température, alors que la tension de circuit ouvert V_{oc} , est très sensible à la variation de la température.
- ✓ Que l'augmentation de la puissance optimale va dans le sens inverse de T.

II.3.2.10. Identification des caractéristiques électriques des modules PV

La méthode la plus simple pour tracer les caractéristiques (courant-tension) et (puissance-tension) d'un panneau PV est de connecter directement à ses bornes une résistance variable pour permettre d'étudier l'évolution de la tension en fonction de l'intensité à différents niveaux d'ensoleillement.

Lorsque la résistance est faible, le rhéostat doit supporter le courant de court-circuit du panneau. Pour l'autre côté de la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$, une valeur de résistance suffisamment grande est nécessaire pour se rapprocher du circuit ouvert.

La figure (23) illustre la maquette d'essai expérimental au laboratoire LTII de l'université de Bejaïa :

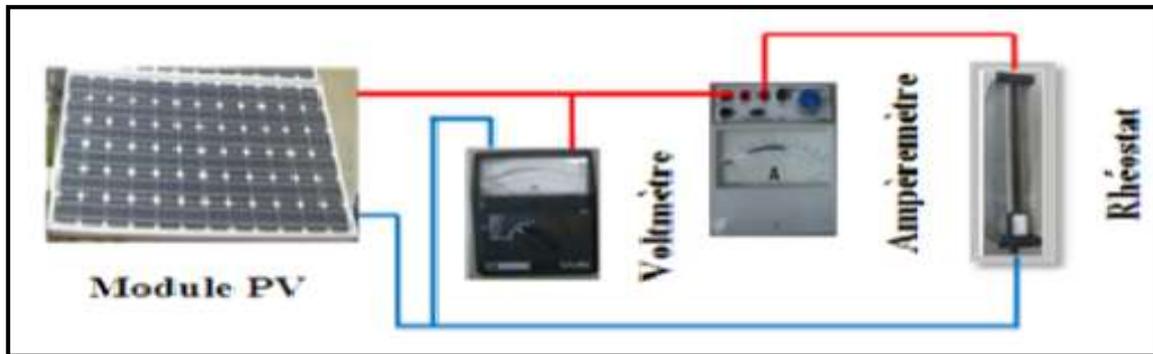


Figure 23. Maquette d'essai expérimental de la caractérisation PV.

La figure (24) montre les caractéristiques (courant-tension) et (puissance-tension) d'un module photovoltaïque pour trois irradiances et trois températures différentes, obtenues lors de l'identification d'un panneau solaire SHARP.

Les résultats de simulation obtenus en utilisant les paramètres fournis par le constructeur sont comparables à ceux obtenus par l'expérimentale.

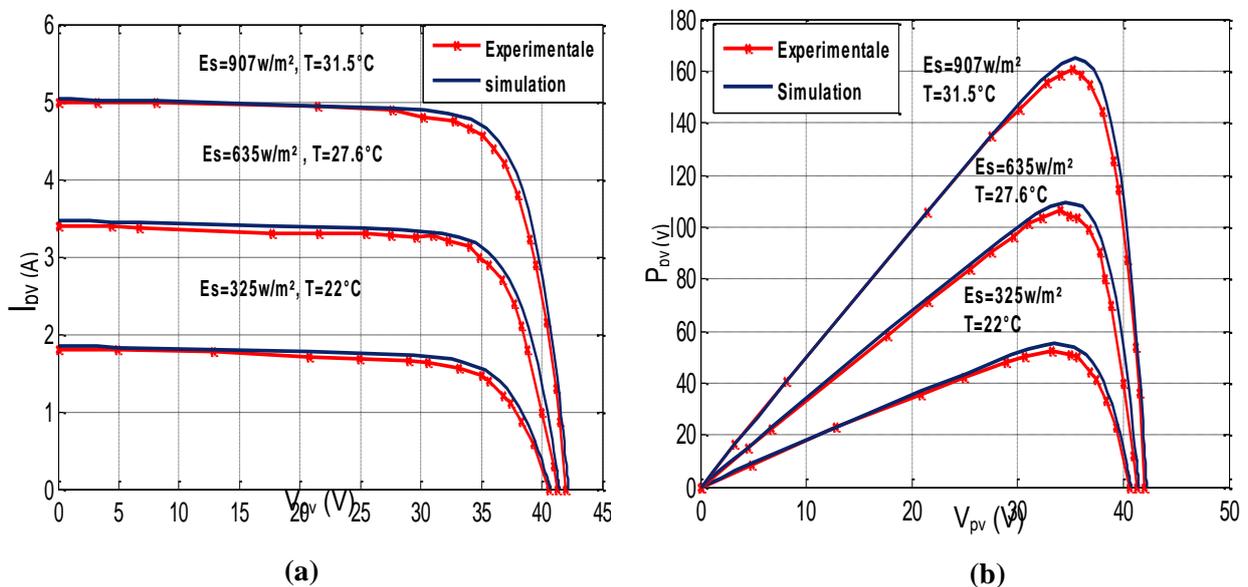


Figure 24. (a) Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et (b) Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ pour différents ensoleillements et températures.

II.3.2.10. Optimisation du générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. La caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ du générateur dépend de l'éclairement solaire (l'irradiation) et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique commandé, permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Ces commandes connus sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) assurant le couplage entre le générateur photovoltaïque et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

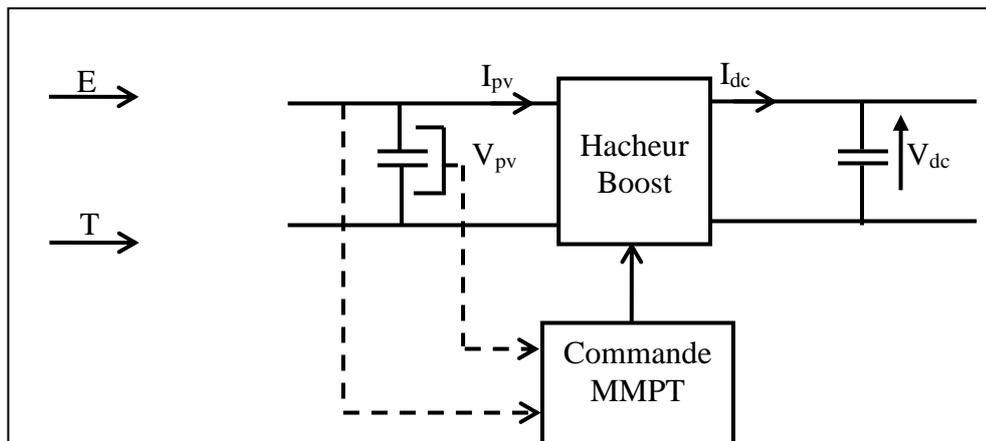


Figure 25. Chaîne de conversion PV avec le contrôleur MPPT.

II.3.2.10.1. Adaptation de l'énergie photovoltaïque

Le module photovoltaïque est un générateur de puissance finie pouvant fonctionner selon toute combinaison de courant et de tension, la meilleure combinaison s'appelle le point de puissance maximale (PPM) qui donne une puissance maximale pour un éclairement et une température donnée. La tension et le courant correspondants sont appelés tension optimale et courant optimum. Une connexion directe ne permet pas de faire fonctionner le module à sa tension optimale (puissance maximale). Il est possible d'insérer un convertisseur DC/DC d'adaptation, appelé extracteur du point de puissance maximale, entre la source photovoltaïque et la charge.

II.3.2.10.2. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)

Par définition, une commande MPPT (maximum power point tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quels que soient les conditions météorologiques (irradiation, température), cette commande ainsi place le système au point de

fonctionnement maximum (V_{pv-opt} , I_{pv-opt}). Le premier système de puissance MPPT à été introduit en 1968 pour un système spatial. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum.

Chapitre III :Energie éolienne

III.1. Introduction

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement . L'évolution de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir ces dernières années une alternative aux sources traditionnelles.

III.2. Principe de fonctionnement de l'éolienne

Une éolienne est une installation qui convertit la puissance de vent en énergie électrique, donc le maximum d'énergie émis ne dépend pas seulement de la machine mais aussi des limites de la vitesse du vent. D'autre part, elles convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique.

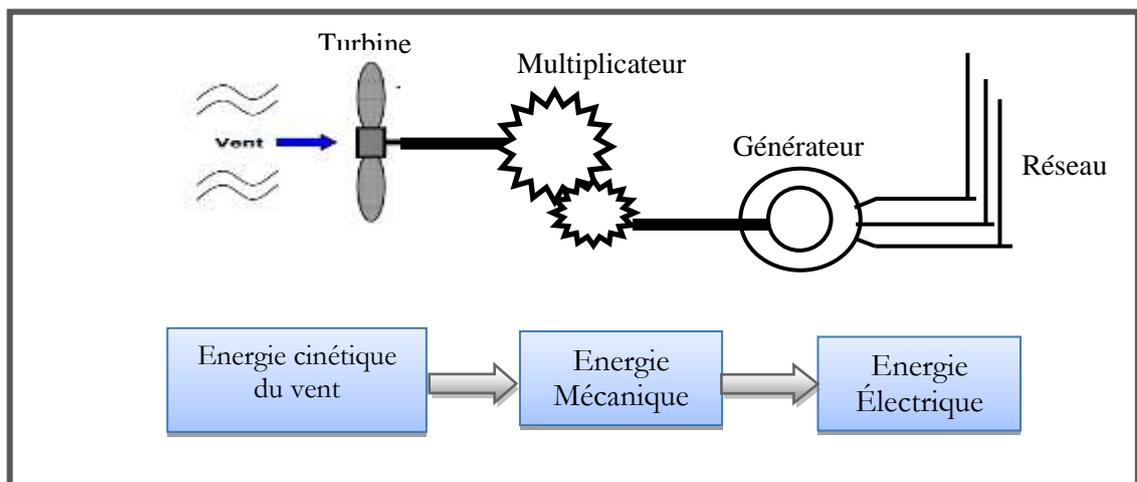


Figure 1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

III.2.1. Transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne capte l'énergie du vent et elle le transforme a une énergie mécanique disponible sur son arbre qui la relie au multiplicateur de vitesse, mais ce n'est pas tout l'énergie cinétique du vent qui sera transformé, car le coefficient de l'éolienne est inférieur ou égale à 0.59, c'est à dire le rotor de l'éolienne ne produit que 59% de l'énergie de vent capté.

III.2.2. Multiplication de la vitesse de rotation par la boîte de vitesse

Pour produire plus d'électricité il faut augmenter la vitesse de rotation de la génératrice, pour cela on aura besoin d'un multiplicateur de vitesse, qui est placé juste après la turbine et avant la génératrice, mais l'inconvénient c'est que cette pièce mécanique est lourde et son coût est élevé, et elle a besoin d'entretien.

III.2.3. La génératrice

Elle est logée dans la nacelle de l'éolienne, et elle transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, elle peut être une machine synchrone, asynchrone ou même à courant continue.

III.3. Composition de l'éolienne

Généralement l'éolienne est composée de :

- **Un mât** : Qui soutient la nacelle. Plus le mat sera haut, plus le vent sera fort et régulier ainsi les ingénieurs construisent des mats toujours plus grands afin d'augmenter le rendement de l'éolienne. Un système d'orientation est fixé sur le mat, celui-ci fait pivoter la nacelle et permet aux pales de l'éolienne de se retrouver face au vent.
- **Une nacelle** : Elle se situe au-dessus du mat. Cette partie de l'éolienne abrite les composants nécessaires à la transformation de l'énergie du vent en énergie électrique.
- **Un rotor** : situé à l'avant de la nacelle.il est composé de plusieurs pales.
- **Pales** : Les ingénieurs préfèrent construire des éoliennes à trois pales pour diverses raisons .
- **Moyeu** : C'est la pièce centrale sur laquelle les pales doivent tourner autour de son axe.
- **Un frein** : Situé lui aussi dans la nacelle : permet à l'éolienne de fonctionner en cas de vitesses des vents trop importantes (maximum de 90km/h soit environ 30 tours/minutes) qui

pourrait l'endommager ou la rendre incontrôlable en réduisant la vitesse de rotation du premier rotor.

- **La génératrice** : Transforme l'énergie mécanique de rotation du second rotor en énergie électrique . La génératrice la plus souvent utilisé dans une éolienne est un alternateur : il délivre une tension alternative lorsqu'il est mis en rotation.
- **Le système de régulation électrique** : Ralenti le rotor du générateur en cas de surrégime.
- **Le système d'orientation** : Place la nacelle et donc les pales face au vent.
- **L'armoire de couplage au réseau électrique** : Rend compatible l'énergie produite avec celle du réseau ce qui consiste à transformer la tension à une grande tension et la réinjecte dans celui-ci.
- **Le multiplicateur** .
- **L'anémomètre** : instrument qui sert à indiquer la direction et la vitesse du vent ; généralement placé au sommet de l'éolienne, l'anémomètre est directement relié à un ordinateur qui va automatiquement faire pivoter le rotor pour placer les pales face au vent.

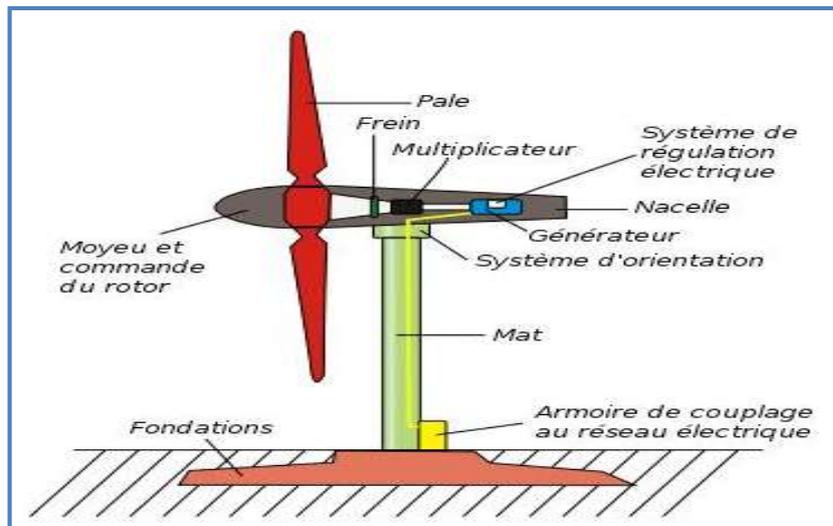


Figure 2. Éléments constitutifs d'une éolienne

III.4. Coefficient de puissance

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p (\cdot \rho \cdot \pi \cdot R_p^2 \cdot V_v^3)$$

C_p : Est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine $C_p(\lambda)$ c'est la caractéristique propre de la turbine.

ρ : Est la masse volumique de l'air.

S : La surface balayée par la turbine.

V_V : La vitesse du vent.

le coefficient de puissance (C_p) caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme le rapport suivant :

$$C_p(\lambda) = \frac{P_t}{P_{vent}}$$

Il a été démontré par Betz que le pourcentage maximum théorique de la puissance du vent qu'il est possible d'extraire est de $16/27$, soit environ 59%.

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent. Elle peut avantageusement s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ .

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_{vent}}$$

➤ Calcul du coefficient de puissance d'un rotor

Le calcul du coefficient de puissance d'un rotor est basé sur sa géométrie et ses dimensions, ainsi que sur des principes d'aérodynamique et de mécanique des fluides. On représente le plus souvent le coefficient de puissance par une courbe à laquelle on réfère en tant que courbe C_p . La figure suivante présente les courbes C_p typiques pour différents types d'éoliennes.

La courbe C_p est donnée en fonction de la vitesse spécifique et non pas en fonction de la vitesse du vent .

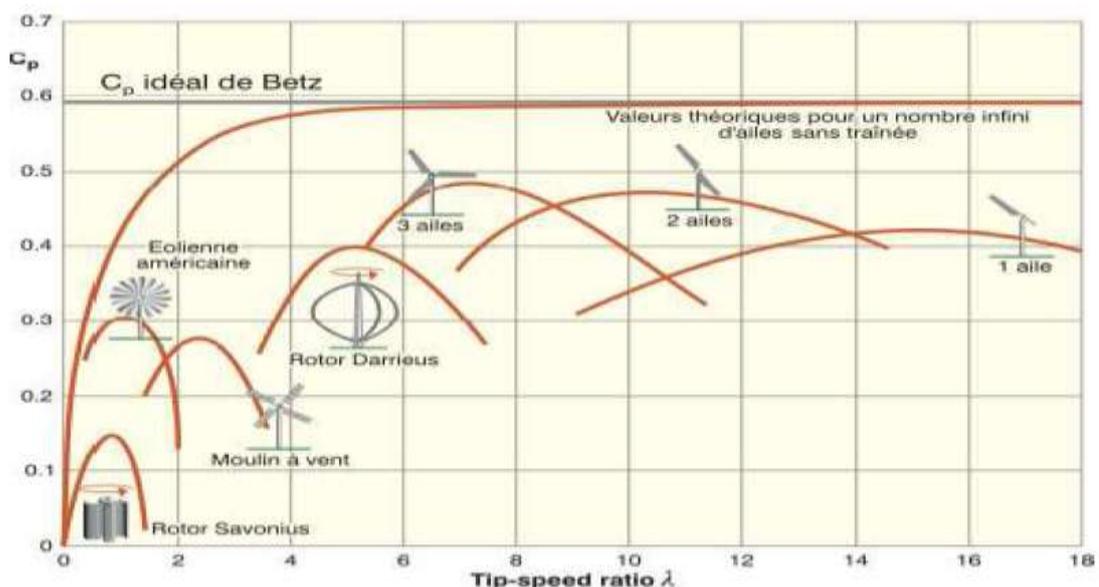


Figure 3. Courbes C_p de différents types d'éoliennes

III.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale V_m qui pourrait endommager la turbine.

On peut définir quatre zones de fonctionnement :

- **la zone I** : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine
- **la zone II** : la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent
- **la zone III** : la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance P fournie reste égale à P_n
- **la zone IV** : dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

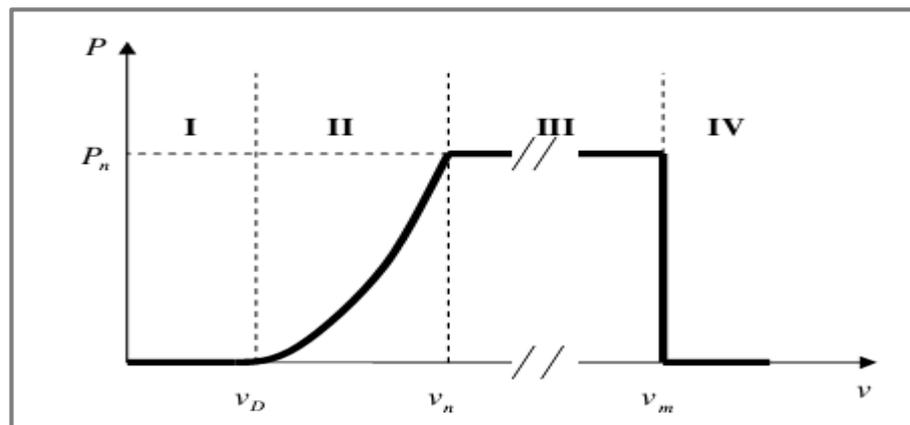


Figure 4. Caractéristique puissance-vitesse de vent d'une éolienne

III.6. Types des éoliennes

III.6.1. Eolienne à axe vertical

Tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique, elles sont comme avantage :

- Fonctionnement à de faible vitesse de vent et pour n'importe quelle direction de vent.
- Elle occupe moins d'espace que les éoliennes a axe horizontale.

On distingue deux types :

- **Eolienne à axe vertical de type Darrieus**

Elle est caractérisée par un rotor forme cylindrique, tronconique, parabolique qui tournent autour d'une tige fixe appelée stator à ailettes.



Figure 5. Rotor a axe verticale de type Darrieus

Cette structure présente plusieurs atouts :

- Génératrice pouvant placée au sol .
- Intégrable au bâtiment

Comme cette structure présente aussi des inconvénients :

- Démarrage difficile par rapport à l' [éolienne de type Savonius](#)
- Faible rendement

➤ **Rotor à axe vertical de types savonius**

Deux demi-cylindres placés en sens opposés sur un axe vertical forment des godets, **le rotor de Savonius dans sa forme la plus basique dessine un S**. Le vent vient s'engouffrer tour à tour dans ces godets, produisant ainsi la **mise en rotation de l'axe afin de générer de l'électricité**. Techniquement parlant, son principe est basé sur un **couple aérodynamique** induit par l'écoulement du flux d'air dans la structure créée par Savonius. Ce type d'éolienne peut s'avérer utile pour capter des vents puissants.



Figure 6. Rotor a axe verticale de type savonius

➤ **Avantage**

- Pas de contraintes sur la direction du vent
- Peu encombrante
- Peu bruyante
- Couple élevé au démarrage
- Pas de contraintes sur la direction du vent
- Esthétique

➤ **Inconvénients**

- Faible rendement
- Masse non négligeable
- Couple non constant.

III.6.2. Éolienne à axe horizontale

L'éolienne horizontale est le modèle le plus répandu. Elle capte le vent grâce à des pales assemblées en hélice de deux ou trois pales en générale. Ce système est réservé aux éoliennes les plus puissantes, et elles sont type adaptée à l'implantation sur terrain.



éolienne à deux pales

moulin américain

éolienne à trois pales

Figure 7. Eolienne à axe horizontale

➤ **Avantage**

- Bon rendement.
- Elles sont mieux adaptées au secteur rural.
- Elles sont plus solides.
- Elles sont équipées d'un système qui permet de les orienter en fonction du vent.

➤ **Inconvénients**

- Elles sont moins simples que les éoliennes à axe vertical.
- Elles sont moins sécuritaires pour les oiseaux car elles tournent à haute vitesse.
- Elles font beaucoup de bruit.

III. 7. Eolienne à vitesse variable

Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents. En vitesse variable, on régule le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le **Maximum Power Point Tracking**.

➤ **Avantage de la vitesse variable**

- Une meilleure exploitation de l'énergie du vent.
- La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques.

➤ **Inconvénient de la vitesse variable**

- L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût.
- Convertisseur de puissance complexe.

III. 8. Eolienne à vitesse fixe

Une éolienne à vitesse fixe désigne le fait que le rotor de celle-ci possède toujours la même vitesse angulaire d'opération, peu importe la vitesse du vent. Cette efficacité de la turbine, représentée par le coefficient de puissance C_p , est optimale uniquement pour une vitesse de vent unique. À cause de la variabilité de la vitesse du vent, cette configuration d'éolienne admet des fluctuations dans la puissance électrique produite et ceci peut créer des instabilités sur le réseau.

Les éoliennes à vitesse fixe possèdent tout de même quelques avantages, soit la simplicité, l'utilisation d'une technologie peu coûteuse et le faible besoin de maintenance.

III. 9. Fonctionnement autonome

Le terme « Systèmes autonomes » regroupe tous les systèmes qui produisent leur propre électricité à partir de sources d'énergies renouvelables. L'autonomie énergétique garantit l'alimentation du système en période d'exploitation sans raccordement au réseau électrique public. Les systèmes éoliens dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète d'un village.

III. 10. Différents types de machine

III. 10.1. Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes elle est simple et présente un bon rendement. Et nécessite pas une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Dans plusieurs éoliennes de petite taille, les aimants tournent autour du stator alors situé au centre de la machine. Il est possible d'immobiliser le rotor en présence de vents modérés de façon à réaliser la maintenance de la turbine.

III. 10.2. Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante.

III. 10.3. Machines asynchrones à cage d'écureuil

La machine asynchrone à cage reste sans conteste celle qui est la plus largement répandue pour des applications en conversion éolienne autonome ou isolée elle a l'avantage d'être

standardisé, fabriqué en grande quantité et dans une grande échelle de puissance, elle aussi la moins exigeante en termes d'entretien. Cette dernière fournit de la puissance active mais absorbe de la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation donc elle est souvent associée à une batterie de condensateurs de compensation.

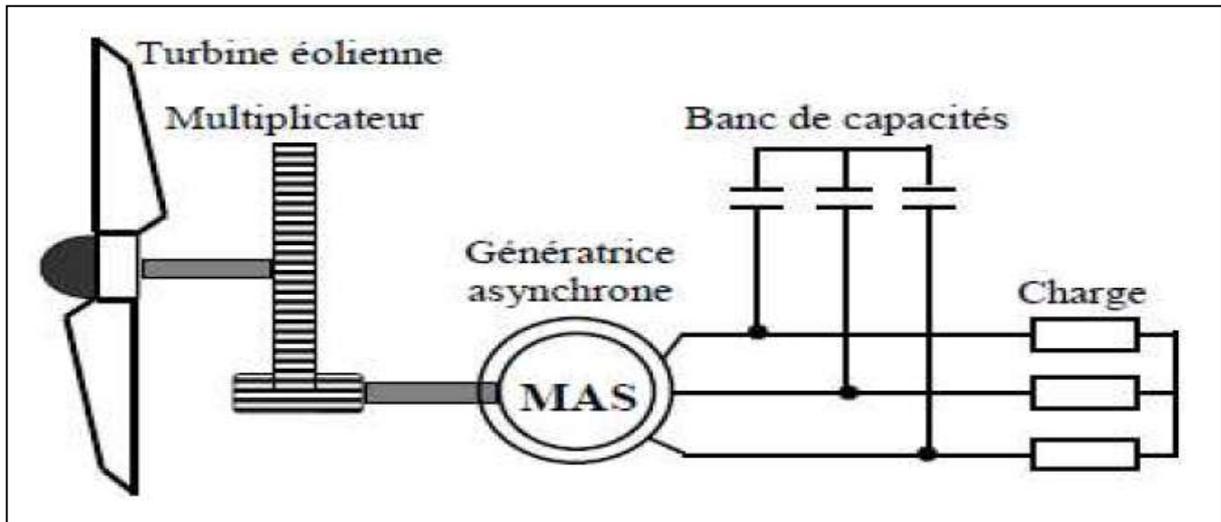


Figure 8. Machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs

III. 10.4. Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence, si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence peut être réduit. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles sont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de systèmes à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant.

III. 11. Système de régulation de puissance

La régulation de vitesse de l'éolienne est importante pour éviter l'emballement des pales, pour des vitesses considérablement importantes, pour cela le producteur des éoliennes doit prévoir un système de régulation de vitesse qui on peut résumer dans cette figure:

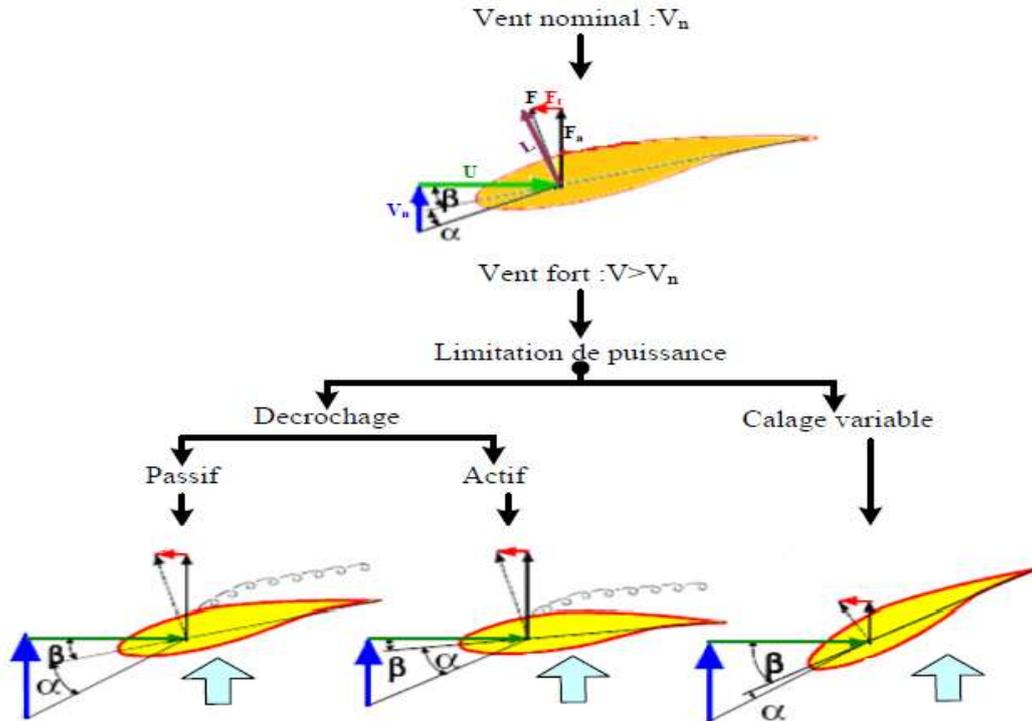


Figure 9. Modèle de contrôle de la puissance capté par la turbine

III. 11.1. Contrôle par angle de calage variable (pitch control)

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à contrôler la puissance mécanique générée par la turbine pour les faibles et fortes vitesses du vent. Pour un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé (pitch control). Pour modifier les performances de la turbine, plus précisément le coefficient de puissance, on varie l'angle d'orientation de ces pales lors des fortes vitesses du vent. Cette technique consiste à varier l'angle de calage des pales, donc l'angle d'incidence, ce qui limite l'action des forces aérodynamiques exercées sur les pales. Cela réduit considérablement toutes les contraintes sur la turbine face aux fortes vitesses du vent, tout en maintenant un couple mécanique Constant qu'on peut annuler par une mise en drapeau .

11.2. Contrôle par décrochage aérodynamique passif (passive stall)

Ce système est plus léger et moins coûteux que le système précédent, à cause de l'absence du système de contrôle de l'angle de calage ; comme il est simple et robuste, du fait qu'il ne dispose d'aucun système mécanique ou électrique auxiliaire. L'angle de calage est fixe, alors que l'angle d'incidence varie avec la vitesse du vent incident, et son augmentation entraîne une augmentation

de la traînée, un décrochage progressif des pales et un maintien de la vitesse de rotation de la turbine constante.

Cependant, l'utilisation de cette technique exige une conception rigoureuse de la géométrie des pales et un choix très précis de la vitesse de rotation de la turbine. Aussi, il faut s'assurer que pour une certaine vitesse du vent, l'augmentation de la puissance soit effectivement empêchée .

III. 11.3. contrôle par décrochage aérodynamique actif

Ce système est l'hybridation des deux systèmes décrits précédemment. Il est utilisé Pour les systèmes de très grandes puissances. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent.

L'orientation des pâles étant très réduite, le dispositif mécanique est plus simple et moins coûteux. Cette technique, appelée aussi décrochage par calage négatif des pales (négative-pitch Control), est basée sur le même principe que le décrochage actif. Cependant, celui-ci est assuré en diminuant légèrement l'angle de calage pour augmenter l'angle d'incidence, et qui peut être légèrement avancé ou retardé. La vitesse est maintenue pratiquement constante jusqu'au décrochage total. La puissance peut donc être limitée à sa valeur nominale .

Chapitre IV : Autres sources renouvelables

IV.1. Energie hydraulique

IV.1.1. Installations à accumulation -Barrages-

Un barrage, c'est un mur construit dans la vallée d'une rivière. L'eau s'accumule derrière ce mur et forme un lac. Lorsque l'on veut produire de l'électricité, on ouvre une vanne (un gros robinet), et l'eau, qui s'écoule dans la conduite, entraîne la roue de la turbine. De cette façon, on peut contrôler la quantité et le moment où l'on produit de l'électricité, ce qui est pratique. En effet, nos besoins ne sont pas réguliers: par exemple, nous consommons beaucoup d'électricité en fin de journée, pour nous éclairer et cuisiner, et très peu au milieu de la nuit, quand tout le monde dort.

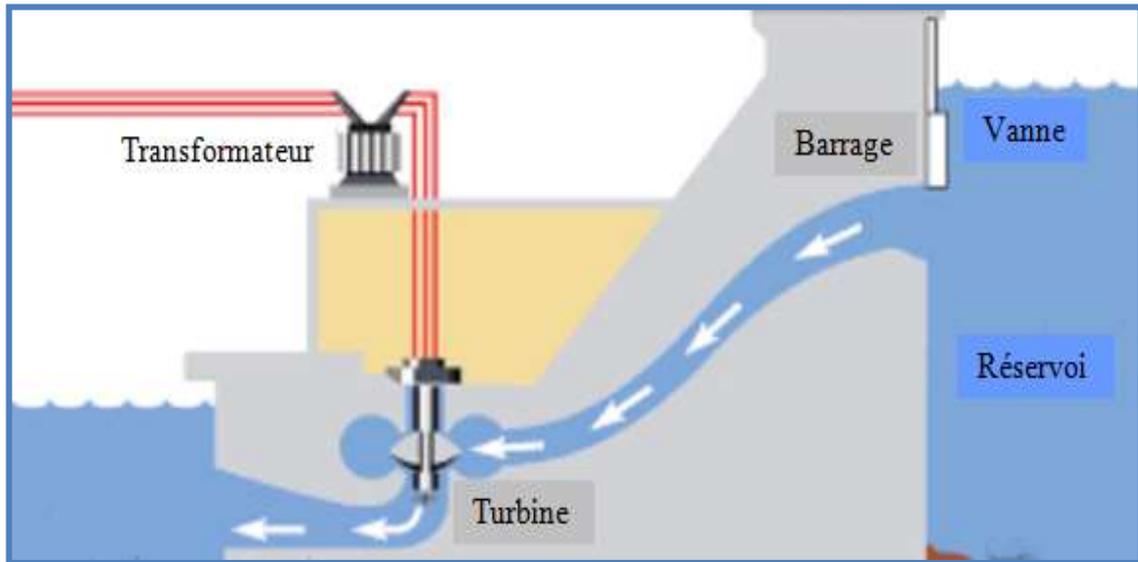


Figure.5. Energie hydroélectrique.

IV.1.2. Energies marines

L'eau des mers, des océans et du littoral est toujours en mouvement et constitue une source d'énergie renouvelable puissante. Encore mal exploitées, les énergies marines sont principalement utilisées pour la production d'électricité.

- ✓ L'énergie hydrolienne :c'est une énergie qui capte l'énergie cinétique des courants de marée.
- ✓ L'énergie marémotrice : consiste à exploiter l'énergie issue des marées dans des zones littorales de fort marnage. Le phénomène de marée est induit par l'effet gravitationnel sur l'océan de la Lune et de Soleil.
- ✓ L'énergie houlomotrice :c'est l'énergie des vagues
- ✓ L'énergie thermique : la différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes.
- ✓ L'énergie osmotique : la différence de teneur en sel entre l'eau de mer et l'eau douce pour produire de l'électricité.

IV.1.3. Usines marémotrices

Comme les moulins à marées d'hier, les usines marémotrices utilisent le mouvement de la marée pour actionner des turbines. Elles sont installées à l'endroit où un fleuve se jette dans la mer et ressemblent aux centrales hydrauliques au fil de l'eau. La différence, c'est que l'eau peut traverser ces installations dans les deux sens : à marée haute, elle remonte dans les turbines, et à marée basse, elle redescend en direction de la mer. La marée est un phénomène sur lequel on peut compter quel que soit le

temps qu'il fait : tous les jours, la mer monte, puis redescend. L'une des plus grandes et des plus anciennes usines marémotrices se trouve en France, près de Saint-Malo. Installée depuis 1966 dans l'estuaire de la Rance, elle est large de 750 mètres et produit l'équivalent de 3,5% de la consommation électrique de la Bretagne.

IV.1.4. Avantages inconvénients

A. Avantages

- Énergie renouvelable ;
- Disponible toute l'année;
- Technologie bien maîtrisée;
- Très bon rendement (90%);
- Installation de très longue durée .

B. Inconvénients

- Impact sur le paysage (barrage...);
- Dépend des conditions météo (pour les installations au fil de l'eau);
- L'installation doit s'adapter à chaque site .

IV.2. Biomasse

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments ! Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante, grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes ! La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz.

IV.2.1. Matières organiques

Les différentes sortes de biomasse sont classées en deux familles: la biomasse sèche et la biomasse humide.

A. Bois (biomasse sèche)

Depuis que l'Humanité maîtrise le feu, elle utilise du bois pour se chauffer ou cuisiner. Aujourd'hui, la technique a évolué mais le principe reste le même: la biomasse sèche est brûlée dans des chaudières. On parle d'énergie-bois. Dans certains pays, comme en Tanzanie ou au Népal, elle couvre 80% des besoins en chauffage.

B. Fumier (biomasse humide)

Les excréments d'animaux mélangés à de la litière sont aussi une forme de biomasse. Tout comme les boues sanitaires, issues de nos toilettes ! Les gaz de fermentation qui se dégagent de ces matières sont utilisés pour se chauffer ou produire de l'électricité. On parle de biogaz.

C. Plantes (biomasse humide)

Les déchets végétaux qui forment le compost, comme les épluchures de cuisine ou les rebuts du jardinage, peuvent aussi servir à produire du biogaz. Il est même possible de produire de l'énergie à partir de la plupart de nos déchets biodégradables : les épluchures de cuisine (compost) et des jardins, les boues sanitaires (WC, douches), les déchets agricoles ou issus de l'industrie agroalimentaire... Certaines plantes peuvent être transformées en carburant pour faire tourner le moteur des véhicules, utilisé à la place (ou mélangé à) de l'essence. Par exemple, la betterave ou la canne à sucre, les graines de tournesol ou les cacahuètes, produisent des biocarburants.

IV.2.2.Utilisation et installations

A. Energie-bois (biomasse sèche)

L'énergie-bois peut être utilisée dans la chaudière d'une maison individuelle, mais aussi par une centrale électrique. Comment ça marche? Des résidus de bois ou des déchets secs sont brûlés pour chauffer de l'eau, qui se transforme en vapeur. La vapeur fait tourner une turbine qui produit de l'électricité. La fumée qui se dégage du feu passe à travers des filtres pour éviter qu'elle ne pollue l'air. Et la vapeur qui traverse la turbine se condense et redevient de l'eau.

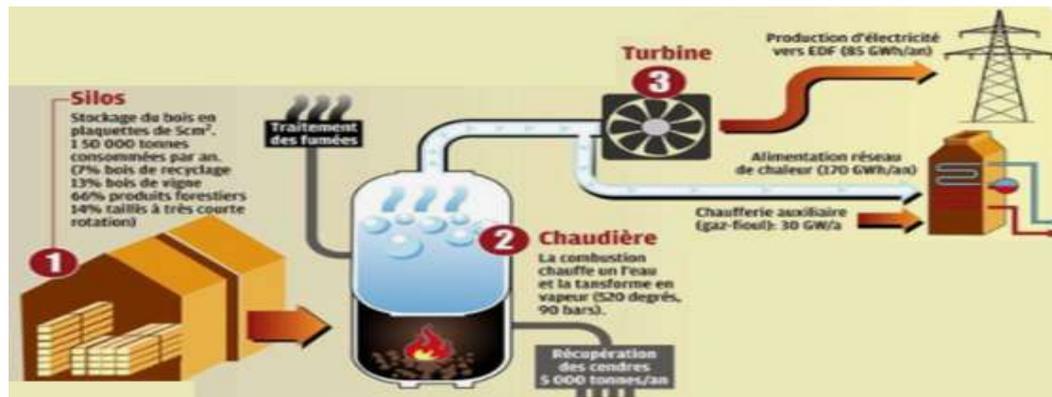


Figure.6. Fonctionnement de la centrale à l'énergie-bois

B. Biogaz (biomasse humide)

As-tu déjà mis ton nez dans un bac à compost? L'odeur désagréable que tu sens, ce sont les gaz qui se dégagent des matières organiques lorsqu'elles se décomposent. Ce processus naturel s'appelle la fermentation. Les centrales de biomasse humide sont des usines équipées de silos ou de grandes cuves qui ne laissent pas entrer l'air, pour justement favoriser la fermentation. Dans de grandes installations appelées "digesteurs", on récupère ces **biogaz**. Ensuite on les brûle pour produire de la chaleur ou de l'électricité.

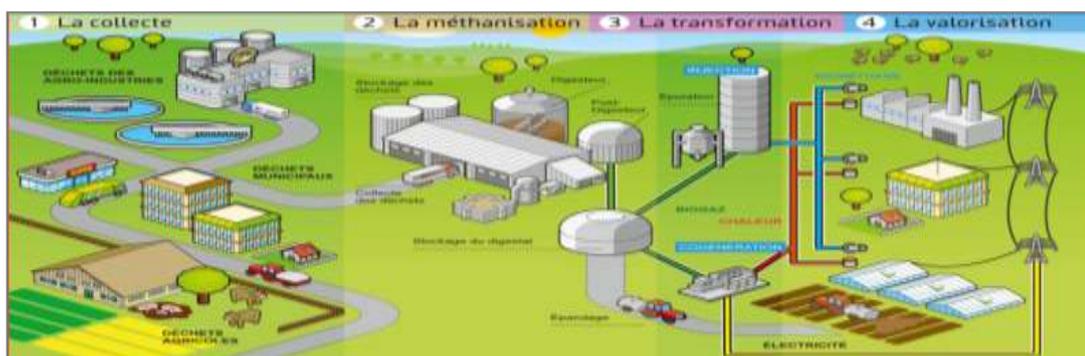


Figure I.7. Le principe du biogaz

Ces installations sont souvent situées dans des zones agricoles. Elles valorisent le fumier, le purin et d'autres déchets issus de l'agriculture. Puis, ce qui ne s'est pas transformé en gaz et qui reste au fond des cuves (les résidus) est utilisé comme engrais pour fertiliser les champs.

C. Biocarburants (biomasse humide)

Il existe deux sortes de biocarburants : le biocarburant essence (éthanol), et le biocarburant diesel. Ils peuvent être utilisés dans les moteurs des véhicules, seuls ou mélangés à des carburants fossiles (pétrole).

L'éthanol est une sorte d'alcool produit à base de plantes riches en sucre ou en amidon, comme la betterave, la canne à sucre, le maïs, la pomme de terre ou le blé. Une première étape consiste à faire fermenter ces sucres. Le "jus" issu de cette fermentation est ensuite distillé pour devenir de l'éthanol.

Le biocarburant diesel, lui, est fabriqué à base de plantes riches en huile, comme les fleurs de colza ou de tournesol, le soja ou les cacahuètes. Les graines sont pressées pour en extraire l'huile qui est ensuite transformée et raffinée pour être utilisée dans un moteur diesel.

IV.2.3. Avantages et Inconvénients

A. Avantages

- Énergie renouvelable ;
- Disponible toute l'année;
- Technologie bien maîtrisée;
- Valorisation des déchets.

B. Inconvénients

- Installation à durée limitée (20 à 30 ans);
- La culture à but énergétique est parfois préférée aux objectifs alimentaires;
- Le chauffage à bois dégage du CO₂ dans l'atmosphère (microparticules).

IV.3. Energie géothermique

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur, par exemple.

IV.3.1 Utilisation et installations

A. Les pompes à chaleur

Les pompes à chaleur utilisent la géothermie de surface pour le chauffage. Elles captent la chaleur souterraine peu profonde, où la température reste inférieure à 30°C. On utilise cette géothermie dite « à basse température », pour chauffer des maisons et de grands bâtiments. C'est la technique la plus fréquemment utilisée en Suisse. Les puits installés peuvent aller de 80 à 400 mètres de profondeur.

Dans le puits, une sonde verticale en forme de "U" envoie un liquide sous terre. Ce liquide est ensuite pompé pour être remonté à la surface. Sa température est alors de 10 à 20°C. Cette chaleur va ensuite être valorisée par une pompe à chaleur qui va élever sa température. Cela permet de chauffer de l'eau pour toute la maison : radiateurs, douches, robinets.

B. Les installations hydrothermales

Il existe des sources d'eau naturellement chaude sur tous les continents et même au fond des mers. Pour les atteindre, on utilise des installations dites hydrothermales. Si les gisements se situent à moins de 3000 mètres, on parle de géothermie de moyenne profondeur. L'eau souterraine atteint alors 50-70°C et est utilisée pour le chauffage. La géothermie profonde permet pour sa part d'atteindre des sources situées à -3000 et -5000 mètres, où l'eau atteint des températures supérieures à 100°C. Surchauffée ou sous forme de vapeur, cette eau jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine, ce qui permet de produire de l'électricité.

C. Les installations pétro-thermales

S'il n'y a pas de source thermale, il est tout de même possible de profiter de la chaleur du sous-sol, avec les installations pétro-thermales de géothermie profonde. Les tours de forages creusent des puits de 3 à 5 kilomètres de profondeur, afin d'installer des sondes qui traversent de la roche à très haute température. On y envoie ensuite du liquide qui, au contact de ces roches naturellement surchauffées, remonte à plus de 100°C. Ce liquide est alors utilisé pour le chauffage et la production d'électricité.

IV.3.2. Avantages et Inconvénients

A. Avantages

- Énergie renouvelable;
- Énergie constante;
- Indépendante de la météo;
- Pas d'émission de CO₂;
- Installation de longue durée (40 à 60 ans);
- Peu d'impact sur la nature.
- Coûts de fonctionnement bas.

B. Inconvénients

- Si peu profonde (forage) : - Utilisation locale - Peu de production électrique.

- Si profonde : - Risque lié aux forages - Rendement électrique faible (5-15%).
- coût d'investissement important.
- Les gaz (souvent) contenus dans l'eau ou la vapeur géothermales peuvent polluer l'atmosphère.
- L'eau géothermale, rejetée dans la nature après avoir cédé sa chaleur, peut polluer les rivières en raison des sels et métaux qu'elle contient.

Chapitre V: Stockage, pile à combustibles et hydrogène

V.1. Les unités de stockage

Les unités de stockage sont des éléments indispensables dans les systèmes en site isolé. Correctement dimensionnées, elles participent en effet à garantir l'autonomie du site, en constituant

une réserve d'énergie lorsque les sources produisent en excédent, et en la restituant lorsqu'elles ne produisent momentanément plus assez.

V.2 Stockage à long terme

V.2.1. Batteries

Dans les batteries, l'énergie est stockée sous forme électrochimique. Elles sont composées de deux électrodes séparées par un électrolyte et des interfaces dans lesquelles interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons. Les ions ainsi générés circulent dans l'électrolyte. Les systèmes de batteries sont constitués d'un ensemble de modules de batteries à basse tension qui se connecte en parallèle ou en série pour obtenir les caractéristiques électriques désirées, elles représentent les systèmes de stockage qui ont la plus grande capacité de stockage d'énergie électrique. Les batteries se chargent quand elles subissent une réaction chimique interne sous un potentiel appliqué à leurs bornes, elles se déchargent, pour la réaction chimique inverse. La batterie au plombacide est la plus utilisée, en raison de son coût qui est relativement faible et de sa disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont beaucoup plus utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale.

Pour des raisons de sécurité, de qualité de service, mais aussi de coût, de nombreux domaines d'application souhaitent ou doivent se prémunir contre toute coupure énergétique, en ayant à leur disposition une source d'énergie indépendante et fiable (une énergie de secours). Parmi les choix possibles, la batterie d'accumulateurs au plomb est une solution de stockage.

V.2.2. Stockage sous forme d'air comprimé

Le principe de ces installations est de comprimer de l'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur. Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Pour être exploité, l'air est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel. Cette technique conduit à stocker de l'énergie sous forme d'air comprimé, soit dans de grandes cavités géologiques (par exemple mine de sel) soit à une échelle plus petite, dans des bouteilles de gaz sous pression. Les inconvénients de cette technologie sont son rendement, la faible manœuvrabilité, l'investissement élevé et la consommation de gaz.

V.2.3. Le stockage par pile à combustible à hydrogène

V.2.3.1. Définition

Une pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui transforme directement l'énergie chimique de la réaction entre un combustible (généralement l'hydrogène) et un comburant (généralement l'oxygène de l'air) en énergie électrique. Dans le cas d'une pile "hydrogène/oxygène", la réaction globale est donnée par l'équation ci-dessous. Le bilan de la réaction finale est la production d'électricité, d'eau et de chaleur.



Une pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte-cathode reliés par l'intermédiaire d'inter connecteurs (ou plaques bipolaires) formant ainsi un « stack » (ou module) comme illustré à la figure (I.18).

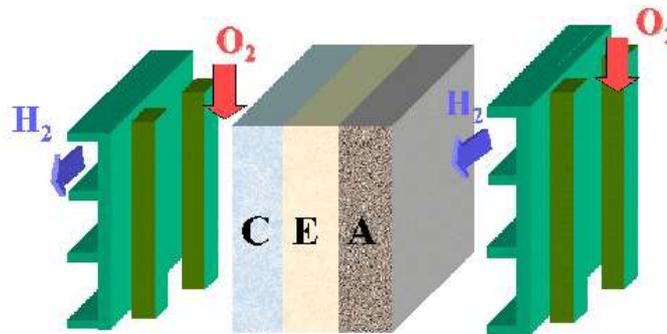


Figure 1. Schéma de principe d'un assemblage de cellules élémentaires Cathode/Électrolyte/Anode et inter connecteurs.

V.2.3.2. Différents types de piles à combustible

C'est l'électrolyte utilisé qui différencie les piles à combustible et qui donne leur nom aux grandes familles de piles. Aussi la température de fonctionnement est un facteur de différenciation et l'on parle de piles à combustible basse température ou haute température.

En pratique plus la température de fonctionnement est basse, plus le système est simple à utiliser. Mais en contrepartie plus les catalyseurs sont onéreux et plus le carburant doit être riche en hydrogène.

Les principaux types de pile à combustible sont les suivants :

- pile alcaline AFC (en Anglais Alkaline fuel Cell) ;
- pile à membrane échangeuse de protons PEMFC (en Anglais Proton Exchange Membrane Fuel Cell) ;
- pile à méthanol direct DMFC (en Anglais Direct Methanol Fuel Cell) ;

- pile à acide phosphorique PAFC (en Anglais Phosphoric Acid Fuel Cell) ;
- pile à carbonate fondu MCFC (en Anglais Molten carbonate Fuel Cell) ;
- pile à électrolyte solide SOFC (en Anglais Solid Oxid Fuel Cell).

Les principales caractéristiques et propriétés de ces différentes piles sont données dans le tableau suivant:

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolyte	Polymère conducteur de protons	Solution alcaline	Acide phosphorique	Carbonate fondu	céramique	Polymère conducteur de protons
Catalyseur	Platine	Platine	Platine	Nickel et l'oxyde de nickel	Cermet nickel-zircone	Platine
Charge mobile	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	H ⁺
Température de fonctionnement en (C°)	40 - 90	65 - 220	205	650	600 - 1000	50 - 130
Rendement électrique pile en(%)	35 - 40	60 - 70	50	65	45 - 65	20 - 30
Champs d'applications	Automobile , cogénération	Applications spatiales	Cogénération	Cogénération	Cogénération	Applications mobiles

Tableau 1. Différents types de piles à combustible .

V.2.3.3. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une PAC PEM correspond au principe inverse de l'électrolyse de l'eau. Ainsi, là où l'électrolyse de l'eau la dissocie en ses éléments constitutifs, hydrogène et oxygène, la PAC les réunit de manière électrochimique pour produire de l'électricité, rejetant de ce fait de l'eau.

Une cellule de PAC comporte deux électrodes. L'électrode négative est le siège de la réaction d'oxydation du carburant, généralement l'hydrogène. Du côté de l'électrode positive a lieu la réaction de réduction du comburant, généralement l'oxygène de l'air. Les faces des électrodes sont recouvertes par un catalyseur à base de platine qui favorise les réactions d'oxydo-réduction. Les deux électrodes sont séparées par un électrolyte (la membrane). Les protons d'hydrogène circulent de l'anode à la cathode à travers elle. Comme les électrons ne peuvent

traverser cette membrane, ils circulent (sous la forme d'un courant électrique) par un circuit externe pour atteindre la cathode et produisent ainsi de l'électricité. La cathode est alimentée en oxygène, qui se combine ensuite avec les protons pour former de l'eau.

L'ensemble électrode négative – électrolyte – électrode positive constitue le cœur de pile. L'alimentation de celui-ci en réactifs se fait par l'intermédiaire de plaques distributrices. Le carburant et le comburant sont fournis à la pile dans des conditions de pression, température, hygrométrie et pureté définies, de façon continue pour assurer la production du courant.

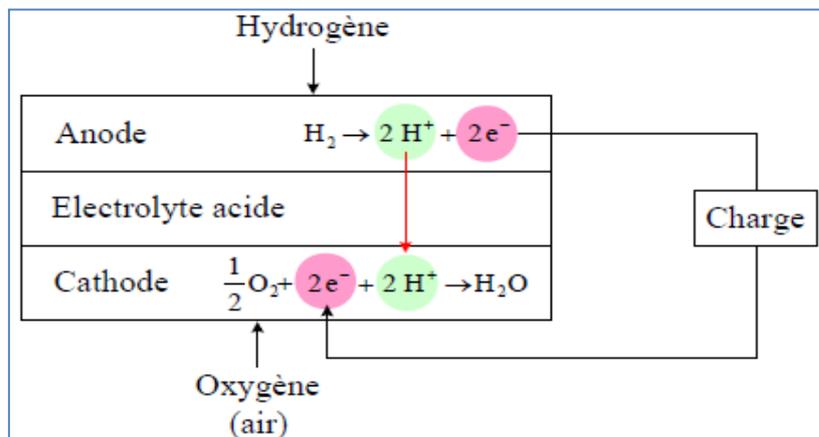


Figure 2. Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide.

La tension thermodynamique d'une telle cellule électrochimique est de 1,23V (si l'on considère que l'eau produite par la réaction est obtenue sous forme liquide et que par conséquent, on utilise la valeur du Pouvoir de Combustion Supérieur – PCS ; « higher heating value – HHV » pour calculer la tension). Toutefois, en pratique, la pile présente une différence de potentiel de l'ordre de 0,6V pour des densités de courant de 0,6 à 0,8A/cm². Le rendement de tension d'une telle cellule est donc d'environ 50%, l'énergie perdue est bien évidemment dissipée sous forme de chaleur. Celle-ci peut éventuellement être réutilisée, en partie du moins dans des systèmes de cogénération ou sur des générateurs équipés de dispositifs à recirculation de l'humidité (roues enthalpiques par exemple).

V.2.3.4. Eléments de base d'une cellule élémentaire de pile PEM

La cellule de base d'une pile à combustible est constituée d'un empilement de deux électrodes poreuses séparées par un électrolyte solide. De chaque côté de l'électrode, on trouve deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires.

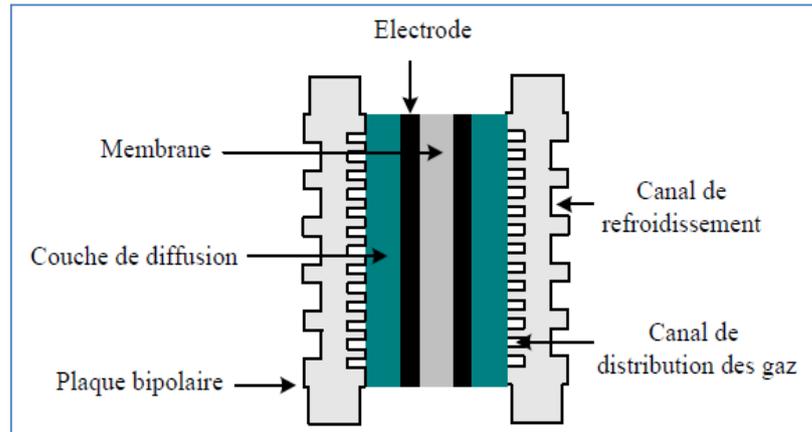


Figure 3. Élément de base d'une cellule de pile à combustible PEM.

A. Plaques bipolaires

La tâche principale des plaques bipolaires est d'assurer l'arrivée des gaz à la surface de la couche de diffusion. Elles sont à base de graphite [83] et contiennent des canaux qui permettent le passage des gaz le long de la surface. Sur le dos de chaque plaque, on trouve généralement des canaux conçus pour transporter le liquide de refroidissement du système (figure 1.4). L'architecture des canaux et des circuits de refroidissement fait encore l'objet de nombreuses études. Les plaques bipolaires servent aussi à collecter le courant et à assurer la mise en série électrique des cellules.

B. Couches de diffusion

Les couches de diffusion assurent une bonne distribution des gaz sur toute la surface de réaction, qui est la surface active de l'électrode. Elles doivent avoir une bonne résistance mécanique à la température et à la présence d'eau.

C. Assemblage Membrane - Electrodes

Les électrodes sont à base d'un matériau carboné sur lequel sont déposés des grains de platine jouant le rôle de catalyseur. Leur épaisseur est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. Le processus de réalisation conduit à les déposer sur la membrane où elles s'imbriquent fortement. Une fois ce processus réalisé, l'ensemble constitue ce que l'on appelle l'Assemblage Membrane – Electrodes (en Anglais MEA, Membrane Electrode Assembly).

V.2.3.5. Relation tension / courant

Le principe de la réaction électrochimique est de maintenir les deux réactifs (H₂ et O₂) dans deux compartiments étanches (anode et cathode) et de permettre la réalisation de deux demi réactions d'oxydoréduction grâce d'une part à l'électrolyte et d'autre part au circuit électrique constitué par la charge. Ceci va permettre de récupérer de travail sous forme électrique, le reste étant forcément libéré sous forme de chaleur (principe de Gibbs). Bien évidemment d'autres phénomènes vont s'ajouter et les pertes associées vont diminuer la part théorique de ce travail électrique. L'équation de Faraday relie l'énergie de Gibbs DG à la différence de potentiel entre les deux électrodes de la cellule :

$$\Delta G = -nF\Delta E \quad (I.4)$$

Ou :

n : est le nombre d'électrons échangés par la réaction.

F : la constante de Faraday (96 485 Coulomb).

On voit donc que dans les conditions standards et avec de l'eau produite sous forme liquide, la tension théorique :

$$\Delta E^0 = \Delta G^0 / nF = 1,23 \text{ V} \quad (I.5)$$

Dans la réalité, même à l'équilibre (courant nul), cette tension V_{Th} n'est pas mesurée aux bornes de la cellule car les deux demi-réactions d'oxydoréduction sont en équilibre dynamique : l'oxydation du dihydrogène en protons H⁺ et en électrons (e⁻) est parfaitement équilibrée par la réaction inverse (réduction), de même la réduction du dioxygène (les protons, les électrons, et le dioxygène (pur ou provenant de l'air) se rencontrent pour former l'eau) est en compétition. Or, pour se produire, ces réactions consomment une énergie d'activation, cette irréversibilité se mesure directement sur la différence de potentiel à vide qui est inférieure à V_{Th}. Notons que le catalyseur et la température jouent un grand rôle dans la diminution de cette énergie d'activation. Une température élevée et un bon catalyseur (Pt platine par exemple) diminuent l'énergie d'activation utilisée par cet équilibre dynamique (loi d'Arrhenius) : la tension à vide s'en trouve augmentée. À vide, un autre phénomène engendre cette diminution de la tension fournie par la cellule : il s'agit des inévitables passages parasites d'hydrogène et d'électrons directement à travers la membrane. Ceci amène le concepteur à se fixer une épaisseur minimale de membrane qui aura des effets

négatifs lors de l'utilisation à densité de courant importante (pertes lors de la migration des protons H^+).

Lorsque le courant croît, on obtient une caractéristique statique tension - courant, dite courbe $V(I)$ de polarisation, qui montre la tension de sortie en fonction de la densité de courant et dont la forme générale dépend des conditions opératoires de la pile (la température de fonctionnement, la pression, la présence de polluants, la bonne répartition du catalyseur, l'état de la membrane et son hydratation, l'état de la couche de diffusion amenant les réactifs aux électrodes...). Selon la densité de courant prélevée, la tension réelle fournie par une cellule est plus ou moins inférieure à cette tension idéale (Figure I.21). Ceci est dû aux diverses irréversibilités se produisant dans ce réacteur électrochimique. On en dénombre trois principales, chacune d'elles réduisant la tension :

$$V_{\text{PAC}} = V_{\text{Th}} - V_{\text{Act}} - V_{\text{Ohm}} - V_{\text{Conc}} \quad (\text{I.6})$$

Où :

V_{Act} : représente les pertes d'activation,

V_{Ohm} : les pertes ohmiques.

V_{Conc} : les pertes dues aux phénomènes de concentrations et de transport de masses.

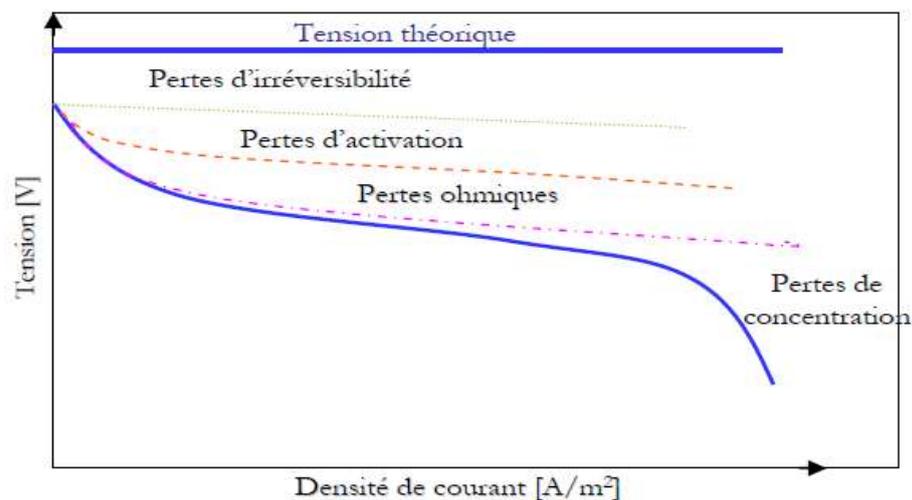


Figure 4. Caractéristique de polarisation et zones de fonctionnement de la PAC

V.2.3.5. Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM

A. Avantages

- Un rendement de conversion important : grâce à la conversion de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique, les pertes dues normalement à la combustion du combustible, puis à la conversion de cette chaleur de combustion en énergie mécanique et enfin de l'énergie mécanique en électrique sont évitées ;
- Un générateur propre : les piles à combustible ne rejettent pratiquement pas de gaz nocifs
- Un système modulable : les piles à combustible sont modulables dans le sens où la taille d'une pile à combustibles peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille.
- Un système relativement silencieux ; comme elle ne comporte pas la partie mobile au niveau du cœur, le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores importantes. De ce fait, les piles à combustible peuvent être placées à proximité de quartiers résidentiels.

B. Inconvénients

- Un fonctionnement à basse température imposé par la membrane actuellement utilisées. Il s'ensuit la nécessité d'utiliser d'une part comme catalyseur du platine et d'autre part d'alimenter le cœur de pile par de l'hydrogène par ce qui nécessite soit l'utilisation de bouteille soit un mode de reformage performant.
- Une technologie qui est encore au stade artisanal ce qui induit des coûts de fabrications élevés. Bien que la structure du cœur de pile soit assez simple.
- Une durée de vie encore faible en particulier si le courant délivré subit des variations importantes et répétées.

V.3. Stockage à court terme

V.3.1. Volants d'inertie

Le stockage d'énergie par masse tournante que l'on appelle couramment volant d'inertie se compose de l'ensemble convertisseur-machine électrique (Machine Asynchrone- volant d'inertie) est appelé système de stockage inertiel .

Lors du stockage, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique par un fonctionnement en moteur de la machine électrique. Ensuite, l'énergie mécanique est stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique dans la masse tournante. Le régime de fonctionnement (moteur ou générateur) est imposé par le convertisseur d'électronique de puissance, qui impose le sens de transfert de l'énergie à travers la machine électrique .

V.3.2. Inductance supraconductrice (SMES)

Les SMES sont des stockages magnétiques qui utilisent des matériaux supraconducteurs qui fonctionnent à très basse température, ce qui permet d'avoir une résistance quasi-nulle. L'absence de résistance dans les conducteurs permet de stocker de l'énergie dans un bobinage court-circuité sur lui-même pendant un temps théoriquement infini. La complexité de ce type de stockage réside dans la nécessité d'avoir un système de réfrigération. Ce système est commercialisé notamment aux États-Unis. Ce type de stockage a été utilisé pour la stabilisation des réseaux (contrôle de P et Q) ou pour améliorer la qualité du réseau.

V.3.3. Super-condensateur

L'énergie électrique est accumulée dans le champ électrique de ses capacités. La technologie est connue depuis les années 80, elle était alors utilisée en électronique. Vers la fin des années 1990, la taille des dispositifs a permis d'envisager des applications à grande puissance . Les super-condensateurs (capacité à double couche) sont des composants dont le principe de fonctionnement est basé sur celui des condensateurs classiques, mais dont la technologie est issue de celles des batteries électrochimiques. Ils offrent des performances supérieures à celles des batteries en densité de puissance et des densités énergétiques plus élevées que les condensateurs. Cette technologie impose l'utilisation des convertisseurs d'électronique de puissance.

Références bibliographiques

- [1] J.C. Sabonnadière , "Nouvelles technologies de l'énergie 1: Les énergies renouvelables", Ed. Hermès.
- [2] D.Rekioua, E. Matagne « Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control », Edition Springer, 2012.
- [3] A. Labouret, "Énergie Solaire photo voltaïque", Ed. Dunod.
- [4] S. Belaid , "Energie Solaire Photovoltaïque", Cours.
- [5] C.Serir, « Commande D'un Système Multi-Sources Photovoltaïque/Eolien Associé à un système de stockage », thèse de doctorat, l'université A. Mira Bejaia, 2017.
- [6] A. Chiali, " Introduction Aux Energies Renouvelables ", Cours.
- [7] H. Saidi , " Energies Renouvelables", Cours.
- [8] S. Bensmail, " Optimisation Et Gestion D'un Système Hybride A Energies Renouvelables", Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie, 2017.