

Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique

Université
Yahia Fares de Médéa

Faculté de Technologie

Conseil Scientifique de Faculté



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة يحي فارس بالمدينة

كلية التكنولوجيا

المجلس العلمي للكلية

N° : 15/11/CDI/FT/2018-2019

**EXTRAIT DU PROCES VERBAL DE LA REUNION
ORDINAIRE N°11 DU CONSEIL SCIENTIFIQUE
DE LA FACULTE DE TECHNOLOGIE
Du Mardi 30 Avril 2019**

Lors de sa réunion ordinaire du **30 Avril 2019**, le Conseil scientifique de la Faculté de technologie a validé le polycopié du **Dr. MEDJBER Ahmed** intitulé : " **Energie renouvelable** ".

Président du CSF

رئيس المجلس العلمي
لكلية التكنولوجيا
الأستاذ : أبو ذرة بلام

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE Dr YAHYA Fares DE MEDEA



COLLECTION DE LA FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

COURS ENERGIE RENOUEVELABLE EN ELECTROTECHNIQUE

Titre :

Energies renouvelables

Auteur : *Dr. Ahmed MEDJBER*



Année : 2018/2019

Approuvé par le Conseil Scientifique de la Faculté en date du :

Les énergies renouvelables sont celles qui se produisent de manière continue, et qui sont inépuisables, à une échelle humaine: solaire, éolien, hydraulique, biomasse et géothermique. Qui sont des énergies de **flux**. La production d'électricité issue des énergies renouvelables repose donc sur la transformation de ces flux en **énergie électrique**.

Elles sont respectueuses de l'environnement, leurs effets sont infiniment mineurs par rapport à ceux des énergies conventionnels (combustibles fossiles, énergie nucléaire, etc.), et sont normalement réversibles, quelques-uns des avantages sont la non émission des gaz polluants de la combustion des fossiles (CO_2 , SO_2 et NO_x), en plus de la non production de résidus dangereux, comme les énergies nucléaires.

Ce document regroupe essentiellement des leçons enseignées à l'université Dr Yahia Fares Médéa en Master 1 spécialité Energie renouvelable en électrotechnique, option : Energies Renouvelables en Electrotechnique.

Nous souhaitons qu'il soit un support de cours du module : **Energie renouvelable**. Le contenu de ce manuel correspond au programme officiel actuel.

Dans ce polycopié nous commencerons le premier chapitre par l'introduction aux énergies renouvelables, au deuxième chapitre, les énergies solaires avec gisement solaire. Au troisième chapitre, nous présenterons l'énergie éolienne. Puis dans le chapitre 4, nous verrons autres sources des énergies renouvelables. et nous terminerons par le chapitre 5, stockage, à pile combustible et hydrogène.

TBLE DES MATIERES

Avant propos

Chapitre 1

Introduction aux énergies renouvelables

<i>I.1. Introduction.....</i>	<i>7</i>
<i>I.2. Historique</i>	<i>8</i>
<i>I.3. Statistique de la production dans l'union européenne.....</i>	<i>8</i>
<i>I.4. Consommation</i>	<i>8</i>
<i>I.5. Gisement solaire.....</i>	<i>8</i>
<i>I.6. Caractéristique du soleil.....</i>	<i>9</i>
<i>I.7. Géométrie solaire</i>	<i>10</i>
<i>I.7.1. Le système terre solaire</i>	<i>10</i>
<i>I.7.2. Unités</i>	<i>11</i>
<i>I.8. L'énergie solaire</i>	<i>12</i>
<i>I.8.1. Origine</i>	<i>12</i>
<i>I.8.2. Caractère particulière.....</i>	<i>12</i>
<i>I.8.3. Captation.....</i>	<i>12</i>
<i>I.9. Le rayonnement solaire</i>	<i>13</i>
<i>I.9.1 Composante du rayonnement solaire</i>	<i>13</i>
<i>I.9.2. Le rayonnement solaire direct.....</i>	<i>14</i>
<i>I.9.3. Le rayonnement solaire diffus</i>	<i>15</i>
<i>I.9.4. Le rayonnement solaire réfléchi.....</i>	<i>16</i>
<i>I.9.5. Le rayonnement solaire globale</i>	<i>16</i>
<i>I.10. Calcule de la position du soleil.....</i>	<i>16</i>
<i>I.10.1. Les paramètres de position.....</i>	<i>16</i>
<i>I.10.2. Les paramètres de temps.....</i>	<i>17</i>

Chapitre 2

Energie solaire (Photovoltaïque et thermique)

II.1. Energie solaire photovoltaïque

<i>II.1.1. Introduction</i>	<i>18</i>
<i>II.1.2. Notion de base sur l'énergie solaire photovoltaïque</i>	<i>18</i>
<i>II.1.2.1. Présentation</i>	<i>18</i>

TBLE DES MATIERES

II.1.2.2. Définitions.....	18
II.1.3. Fabrication de la cellule photovoltaïque	19
II.1.4. Principe d'une cellule photovoltaïque	19
II.1.5. Les différents types des générateurs photovoltaïques	19
II.1.5.1. Silicium mono-cristallin.....	19
II.1.5.2. Silicium polycristallin.....	20
II.1.5.3. Silicium amorphe.....	20
II.1.6. Modèle électrique de module photovoltaïque.....	20
II.1.6.1. Modèle électrique à une diode	20
II.1.6.2. Modèle électrique à deux diodes.....	21
II.1.7. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque	22
II.1.7.1. Caractéristique courant/tension.....	22
II.1.7.2. Caractéristique puissance tension.....	22
II.1.8. Amélioration du rendement d'une cellule photovoltaïque	23
II.1.8.1. Amélioration par l'utilisation d'un suiveur solaire.....	23
II.1.8.2. Amélioration par une commande MPPT	23

II.2. Energie solaire thermique

II.2.1. Introduction	25
II.2.2. Différents types de capteurs solaires existent.....	25
II.2.2.1. Les capteurs non vitrée	25
II.2.2.2. Les capteurs plans	25
II.2.2.3. Les capteurs sous vide	25
II.2.2.4. Les capteurs à concentration	26
II.2.3. Application.....	26
II.2.3.1. Le four solaire.....	26
II.2.3.2. Système de chauffage solaire.....	26
II.2.3.4. Caractéristique technique des capteurs solaires	27
II.2.3.4.1. Les pertes optiques	27
II.2.3.4.2. Les pertes thermiques	27
II.2.3.4.3. Le rendement globale.....	28
II.2.3.4.4. Calcule du rendement (Méthode française).....	28

TBLE DES MATIERES

Chapitre 3 Energie éolienne

<i>III.1. Introduction</i>	30
<i>III.2. Les aérogénérateurs</i>	30
<i>III.3. Emplacement des éoliennes</i>	31
<i>III.4. Puissance récupérable</i>	31
<i>III.5. Les différents types d'éoliennes</i>	32
<i>III.5.1. Eolienne horizontale</i>	32
<i>III.5.2. Eolienne verticale</i>	32
<i>III.5.3. Avantages</i>	33
<i>III.5.4. Inconvénients</i>	34

Chapitre 4 Autres énergies renouvelables

IV.1. La Géothermie

<i>IV.1.1. Introduction</i>	35
<i>IV.1.2. Origine de la géothermie</i>	35
<i>IV.1.3. Le gradient géothermique</i>	35
<i>IV.1.4. Caractéristique générale de la géothermique</i>	35
<i>IV.1.5. La géothermique très base température</i>	36
<i>IV.1.6. La géothermique base température</i>	37
<i>IV.1.7. La géothermique moyenne et haute énergie</i>	37
<i>IV.1.8. Le flux géothermique ou flux de chaleur</i>	38

IV.2. Energie hydraulique

<i>IV.2.1. Introduction</i>	38
<i>IV.2.2. Les roues hydraulique</i>	39
<i>IV.2.3. L'énergie des marées</i>	39
<i>IV.2.4. Les centrales hydrauliques</i>	39
<i>IV.2.5. Les différents types de centrales</i>	40
<i>IV.2.6. Avantages</i>	43
<i>IV.2.7. Inconvénients</i>	43

TBLE DES MATIERES

IV.3. La biomasse

<i>IV.3.1. Introduction</i>	44
<i>IV.3.2. Les applications de la biomasse</i>	44
<i>IV.3.2.1. La biomasse comme biocombustible pour produire de la chaleur et de l'électricité</i>	44
<i>IV.3.2.2. La biomasse comme la matière première de la chimie</i>	45
<i>IV.3.2.3. La biomasse pour les biocarburants</i>	46
<i>IV.3.3. Avantages</i>	46
<i>IV.3.4. Inconvénients</i>	47

Chapitre 5

Stockage, Pile à combustible et l'hydrogène.

<i>V.1. Introduction</i>	48
<i>V.2. Définition de PEMFC</i>	48
<i>V.3. Description de PEMFC</i>	48
<i>V.4. Structure interne de PEMFC</i>	49
<i>V.5. Les différents types de pile à combustible</i>	49
<i>V.5.1. De point de vue de température</i>	50
<i>V.5.2. De point de vue puissance</i>	50
<i>V.5.3. De point de vue application</i>	50
<i>V.5.4. De point de vue membrane</i>	50
<i>V.6. Principe de fonctionnement</i>	51
<i>V.7. La force électromotrice</i>	53
<i>V.8. Potentiel thermodynamique réel de PAC</i>	54
<i>V.9. Modélisation de pile à combustible PEMFC</i>	54
<i>V.9.1. Modèle statique de PAC</i>	54
<i>V.9.2. Modèle dynamique de PAC</i>	56
<i>Bibliographie</i>	60

I.1 Introduction

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique. La limitation de la quantité de ces réserves, la crise successive du pétrole en 1973 et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement. La filière nucléaire était déjà lancée, mais son choix à grande échelle peut amener des conséquences graves, surtout à l'environnement, à cause de la pollution et aussi les accidents nucléaires.

Les chercheurs ont développé une autre forme d'énergie dite « *énergie renouvelable* ». Ces énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes puisqu'elles n'émettent pas de gaz favorisant l'effet de serre, CO₂.

Parmi ces énergies renouvelables, on peut citer la production d'électricité d'origine solaire par l'effet photovoltaïque (cellules solaires ou photopiles). La conversion de la lumière en électricité (conversion photovoltaïque) se produit dans des matériaux semi-conducteurs. Le photovoltaïque peut jouer un rôle important dans la transition vers un système d'approvisionnement énergétique durable pour le XXI^{ème} siècle et est susceptible de couvrir une part importante des besoins en électricité de plusieurs pays.

L'Algérie avec sa situation géographique, occupe une position privilégiée dans l'exploitation d'énergie solaire avec une durée d'ensoleillement qui varie de 2650 heures /an dans le nord à 3500 heures/an dans le sud, l'une des plus élevées au monde.

Elle reçoit le maximum d'énergie lors du solstice d'été (21 ou 22 juin) et le minimum lors du solstice d'hivers (21 ou 22 décembre).

Dans ces dernières années, la production d'électricité à partir de la conversion photovoltaïque augmente dans le monde d'une façon remarquable. Cependant, la part de cette conversion en électricité reste faible comparativement à celle des autres énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne ou biomasse. Le principal obstacle à la pénétration du marché par le photovoltaïque est le coût de cette technologie qui rend l'électricité produite trop chère pour de nombreuses applications. En effet, la plupart des cellules solaires (~99%) sont fabriquées à partir du silicium et malgré leur bon rendement, le coût des cellules reste élevé. L'industrie du photovoltaïque doit devenir plus concurrentielle et mettre au point des procédés de fabrication et des systèmes de conversion plus rentables.

Que sont les sources d'énergie renouvelable ?

Comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent assez rapidement et ne s'épuisent donc jamais à l'échelle du temps humain. Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique (l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol terrestre, on fait circuler un fluide dans le sous-sol terrestre qui remonte la vapeur d'eau. Celle-ci va alimenter des turbines qui vont la transformer en électricité), marine et la biomasse (organiques d'origine végétale, animale ou fongique pouvant devenir source d'énergie par **combustion ou par transformation**, Le bois peut être brûlé et remplacer le chauffage au gaz ou électrique), certains types d'énergie renouvelable se sont fortement développés notamment en France et en Europe. Les sources non renouvelables sont les énergies fossiles dont les gisements limités peuvent être épuisés. comme le pétrole, le charbon (de bois) et le gaz, l'uranium qui est utilisé pour le Nucléaire, Le Nucléaire est aujourd'hui l'une des principales sources énergétiques en France, en Europe et dans le Monde, Elles émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (CO₂) responsables du changement climatique (il est indispensable de protéger notre environnement contre la pollution par réduction de notre consommation d'énergie Cette consommation augmentera chaque année de

1,4% par an si aucun geste n'est fait), Même si l'industrie nucléaire est peu émettrice en CO₂, la gestion de ces déchets radioactifs, très dangereux, est problématique et cela engendre des émissions de CO₂ importantes.

Les énergies sont utilisées dans tous les domaines, et à toutes les échelles: industrielles, transports, électricité, chauffage... elles sont utilisées dans la vie quotidienne.

I.2 Historique:

La forme la plus ancienne est la biomasse qui était utilisée grâce au feu. Ensuite, vient le vent, l'utilisation de l'énergie éolienne venait de naître, (moulins à vent puis moulins à eau). Puis les énergies modernes comme le charbon (de bois au 19^{em} siècle), le pétrole (et le gaz au 20^{em} siècle).

Les énergies renouvelables et l'environnement entraînent l'engagement depuis plusieurs années avec des associations. Elles se sont engagées pour l'aide aux personnes pour l'installation d'énergies renouvelables, pour la prévention et le respect de l'environnement et dans des campagnes pour l'économie d'énergie.

ADEM, ou EAEM: Environment Agency and the Energy Management (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

Greenpeace, WWF: Associations peuvent fonctionner au niveau international et intervenir dans tous les domaines de la protection de l'environnement.

CCE : La Commission de coopération environnementale de l'Amérique du Nord, est une organisation internationale créée par le Canada.

CIVAM : centres d'initiatives pour valoriser l'agriculture et les milieux ruraux), CPIE : Centre permanent d'initiative à l'environnement.

I.3 Statistique de la production d'énergie dans l'union européenne (UE)

La production d'énergie renouvelable En 2013, s'élevait à 192 millions de tonnes-équivalent pétrole (tep), soit 24,3 % de la production d'énergie totale, La biomasse et les déchets 64,2 %, énergie hydraulique 16,6 % du total, énergies éolienne et solaire respectivement 10,5 % et 5,5 %, l'énergie géothermique 3,1 %, marémotrice 0,02 %. L'Allemagne a été le plus grand producteur d'énergie renouvelable de l'UE en 2013, avec 17,5 % du total. L'Italie (12,2 %) et la France (12,0 %), l'Espagne (9,1 %) et de la Suède (8,7 %).

I.4 Consommation

En 2013, les sources d'énergie renouvelables représentaient 11,8 % de la consommation intérieure brute d'énergie dans l'UE. La part des énergies renouvelables était relativement importante au Portugal (23,5 %), au Danemark (24,2 %), en Finlande (29,2 %) et en Autriche (29,6 %), en Suède (34,8 %) et en Lettonie (36,1 %), de même qu'en Albanie (31,0 %), et en Norvège (37,4 %).

I.5 Gisement solaire

L'énergie solaire peut trouver leur origine dans les différents flux énergétiques naturels incidents à la surface de la terre, qui sont:

- ✓ Le rayonnement solaire qui fournit 99.97% de sa densité thermique.
- ✓ La chaleur interne terrestre qui fournit 0.03% de sa densité thermique.

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'homme. Lorsque l'énergie lumineuse (photons) rencontre de la matière, celle-ci transforme une partie en chaleur. C'est ce qu'on appelle la conversion photo thermique, et c'est sur ce principe que sont basés les

procédés de capteur plan solaire L'énergie solaire pour son utilisation exige un système de captation solaire de deux types :

- Capteur solaire photo thermique
- Capteur solaire photovoltaïque

I.6 Caractéristiques du soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. Le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie. Le soleil est une étoile pseudo-sphérique qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% tous les éléments chimiques connus, il représente 99.9% de la masse du système solaire Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau I.1:

Tableau I.1: Caractéristiques principales du soleil

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	$2 * 10^{30}$
Surface (km ²)	$6.09.10^{12}$
Volume (km ³)	$1.41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de :

1. Le noyau contient 40% de la masse du soleil, l'épaisseur de 25.10^4 km, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, elle présente les caractéristiques suivantes:
 - Une température de 15.10^6 °C.
 - Une densité est de 1015 kg/m³.
 - Une pression de 109 ATM (atmosphère moyenne).
2. La zone radiative elle présente les propriétés suivantes
 - Une épaisseur de 244160 km.
 - Une température variant de 10.10^6 °C à 50.10^4 °C.
3. La zone de convection elle présente les propriétés suivantes :
 - a) La photosphère est une couche opaque, Elle présente les caractéristiques suivantes:
 - La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.
 - Une épaisseur de 500 km.
 - Une pression de 1/100 ATM.
 - b) La chromosphère, cette couche présente les caractéristiques suivantes:
 - Une épaisseur 2000 km.
 - Une température augmentant de 4200 °C à 10^4 °C.
 - c) La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont:
 - Elle est sans limite précise.
 - La température augmente de 10^6 °C à 2.10^6 °C.

La figure I.1 montre la structure du soleil.

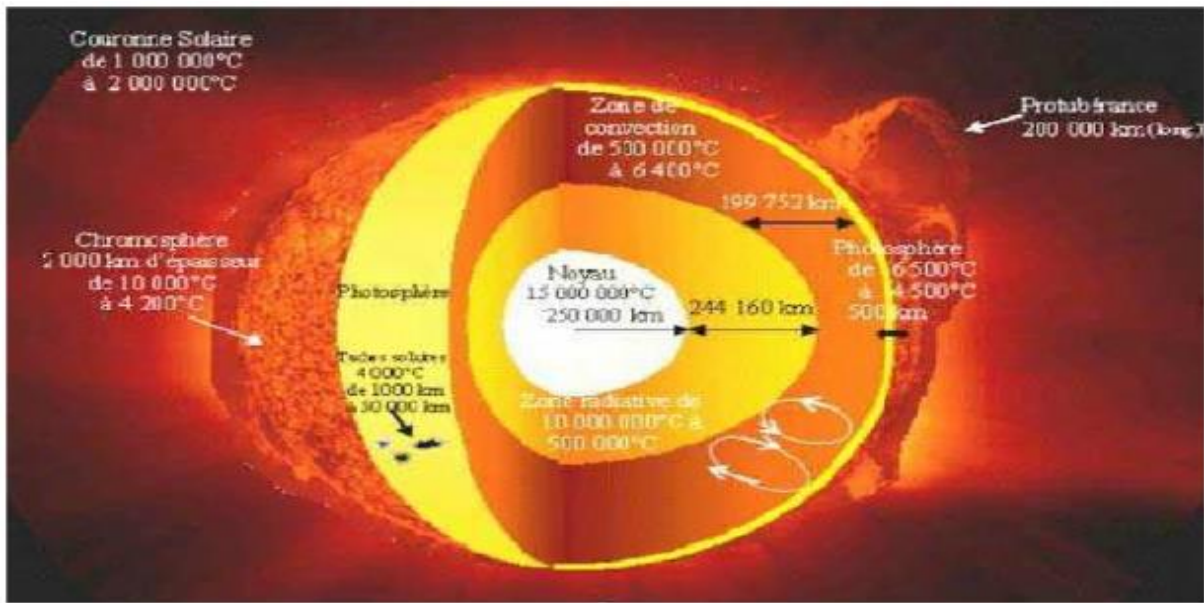


Figure I.1: Structure du soleil

I.7 Géométrie solaire :

I.7.1 Le système terre-soleil

La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique. Sa distance moyenne est de 147 millions de km au mois de janvier, et 152 million de km au mois de juillet.

La terre traverse le grand axe de l'ellipse le 2 janvier (position la plus proche) et le 2 juillet (la plus éloignée du soleil). Depuis la terre, le diamètre apparent du soleil est vu sous un angle de 0.5°.

L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de 23° par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison l'angle formé par l'axe terre soleil, avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison 'd' vaut donc + 23°27' au solstice d'été, - 23°27' au solstice d'hiver, et est nulle aux équinoxes. Dans l'approximation d'une trajectoire circulaire, la déclinaison s'écrit, pour chaque jour de l'année :

$$\sin \delta = 0,4 \cdot \sin t \quad (I.1)$$

Où : t désigne la coordonnée angulaire de la terre en prenant l'équinoxe de printemps pour Origine.

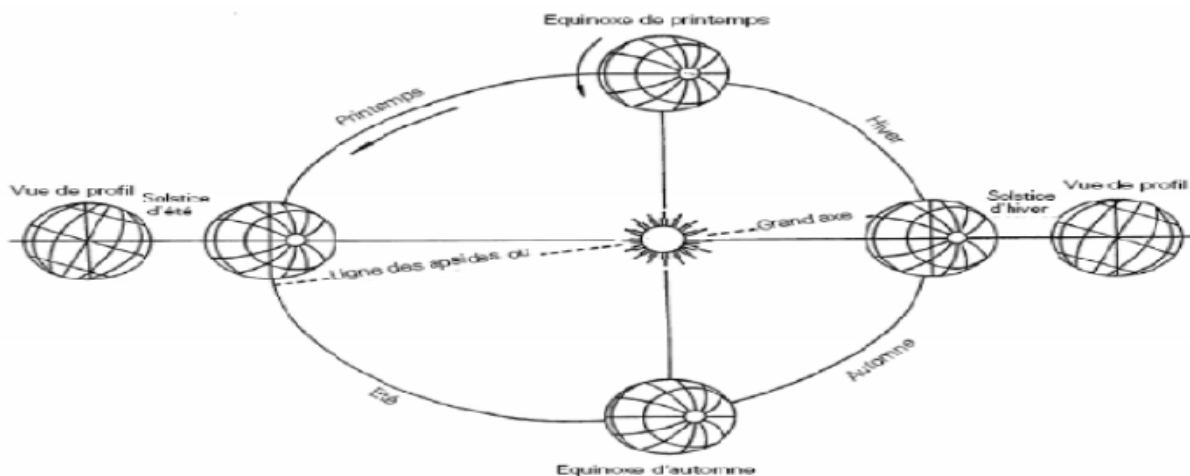


Figure I.2: Plan de l'écliptique L'orbite terrestre et les saisons

I.7.2 Unités:

1. *L'éclairement E:* est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en W/m² (watt par mètre carré). Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367 W/m². Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m²

2. *L'irradiation ou rayonnement H:* est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime En J m⁻² (joule par mètre carré). *Constante solaire :* Une surface plane d'un mètre carré perpendiculaire a rayonnement solaire et située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée fonction de la distance solaire terre. La variation de la constante solaire suit la relation suivante :

$$C = C^* + 0.033 * \cos(0.948 * n) \tag{I.2}$$

C* : la constante solaire.

On a : C₀*=1353 W/m² est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue.

n: le numéro du jour de l'année.

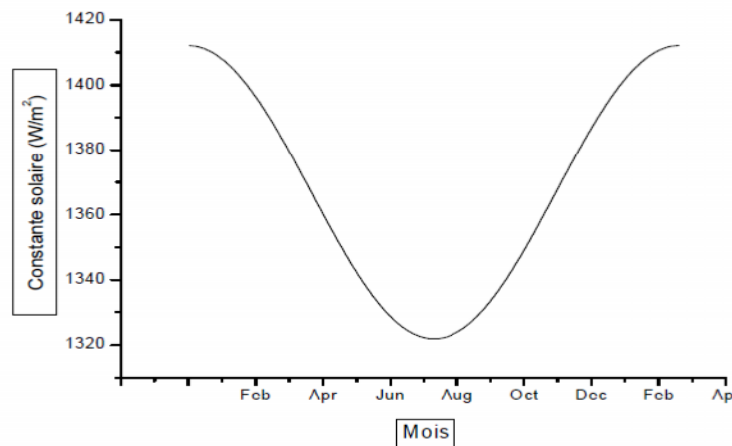


Figure I.3: Variation mensuelle de la constante solaire [6]

Tableau I.2 : Valeur du flux solaire à la limite de l'atmosphère terrestre. Ecart relatif Par rapport à la constante solaire C* =1353 W/m².

Date le 1 ^{er}	Puissance surfacique W/m ²	écart relatif en % / C*
janvier	1399	+3.40
Février	1394	+3.03
Mars	1379	+1.92
Avril	1354	+0.07
Mai	1333	-1.48
Juin	1312	-3.03
Juillet	1308	-3.33
Août	1312	-3.03
septembre	1329	-1.77
Octobre	1350	-0.22
Novembre	1373	+1.48
Décembre	1392	+2.88

I.8. L'énergie solaire :

I.8.1 Origine :

L'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau D'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X. Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3.7.10^{26}$ j/s.

I.8.2 Caractères particuliers :

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés Suivantes :

- Elle est propre, sa densité de puissance maximale est de 1kW/m² à midi par ciel bleu sur toute la planète.
- La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol (1 kW/m²). Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.
- L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.

I.8.3 Captation :

Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie à savoir.

1. L'énergie solaire thermique :

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

- ✓ En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- ✓ En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

2. L'énergie solaire thermodynamique :

La solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélios thermoélectriques, Trois types principaux de centrales sont utilisés:

- ✓ Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.
- ✓ Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre des températures de 1000°C ou plus.
- ✓ Les centrales à tour pour atteindre 1000 °C.

3. L'énergie solaire photovoltaïque :

Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé ; cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux.

I.9 Le rayonnement solaire:

Les réactions thermo nucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de $3 \cdot 10^{16}$ les rayons X et gamma jusqu'a l'I.R lointain. Cependant 99,9% de l'énergie se situe entre 0.2 et $8 \mu\text{m}$.

On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir porté à une température de 5762 K dite température apparente du soleil ne correspondant pas à la réalité physique [8]. La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le tableau I.3

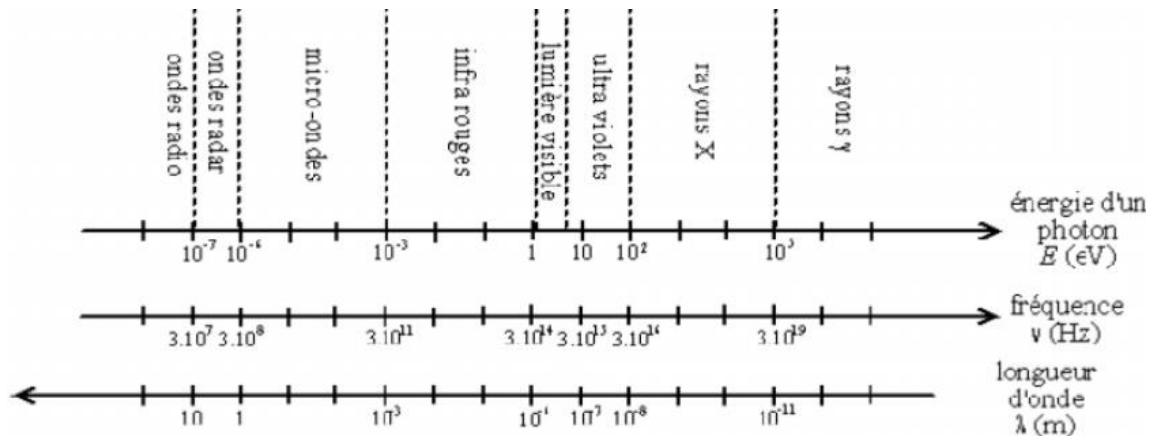


Figure I.4: Spectre Solaire

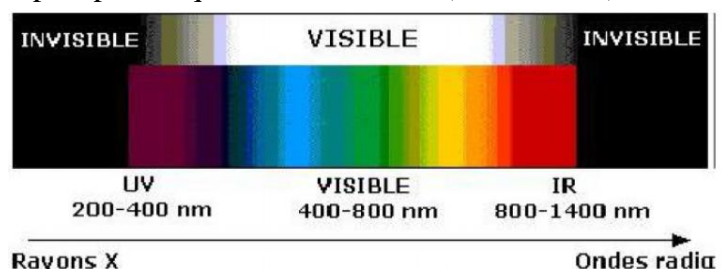
Tableau I.3: Répartition spectrale du rayonnement thermique

Longueur d'onde (μm)	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Pourcentage (%)	6.4	48	45.6
Energie (w/m^2)	87	656	623

I.9.1 Composante du rayonnement solaire

Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000 °K. A une telle température, 40% de l'énergie est émise dans le domaine visible, c'est-à-dire dans une gamme de longueur d'onde allant de 0,3 μm (violet - bleu) à 0,7 μm (rouge). La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction. Tout un éventail de couleurs apparaît, du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune. Chacune de ces couleurs est associée à un rayonnement d'une certaine longueur d'onde. William Herschell (Vers 1800) qui étudiait le rayonnement solaire, avait placé un thermomètre derrière un tel prisme. Il s'aperçut qu'il indiquait une élévation de température (et donc qu'il recevait de l'énergie) non seulement dans le domaine visible mais également dans la région au de là du rouge. Ce fut la découverte du rayonnement infrarouge qui représente 50% du rayonnement émis par le soleil. Les 10% restant du rayonnement solaire total sont émis à l'opposé du domaine visible, à des longueurs d'onde plus petites que celles du violet (l'ultra violet).

Figure I.5: Répartition du rayonnement Solaire.



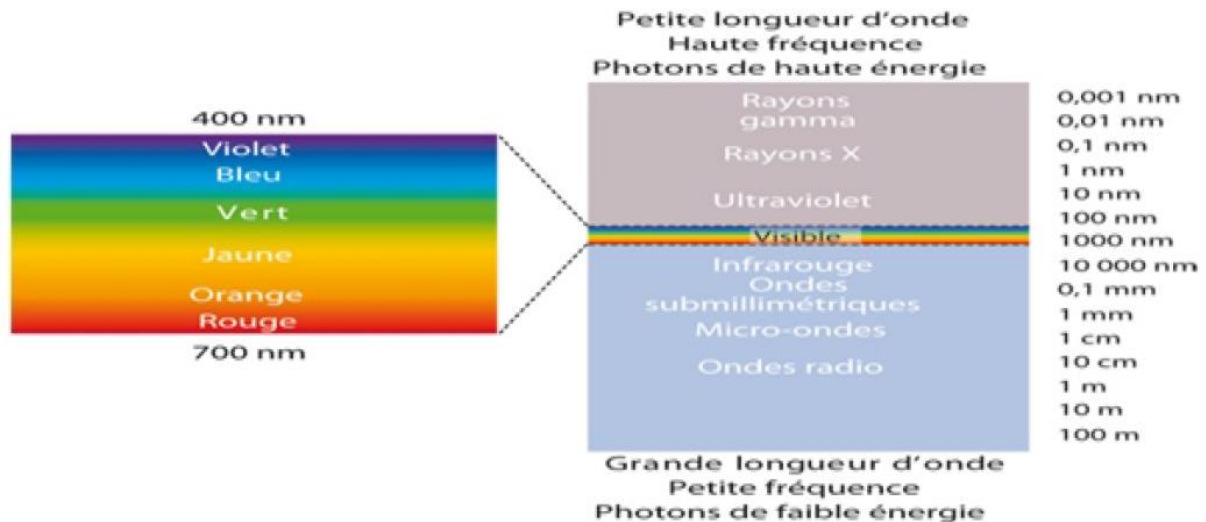


Tableau I.4: Emission du rayonnement solaire

Longueur d'onde constituant le rayonnement solaire température		
Domaine ultra-violet inférieure à 0.3 μm (violet-bleu)	Domaine visible de 0.3 μm (violet-bleu) à 0.7 μm (rouge)	Domaine infrarouge au-delà de 0.7 μm (rouge)
10%	40%	50%

I.9.2 Le rayonnement solaire direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair

$$\tau_{dir} = a * e^{-\frac{p*b}{1000*\sin(h)}} \tag{I.3}$$

a, b: coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

h: hauteur du soleil.

P : pression atmosphérique du lieu.

Tableau I.5: Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique

	Ciel pur	Condition normales	Zones industrielles
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

Tableau I.6: Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	2500
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontal est donné par:

$$G_{dirh} = C^* * \tau_{dir} \tag{I.4}$$

G_{dirh} : éclairement énergétique direct reçu sur un plan horizontal.

L'éclairement énergétique G_{dir} reçu sur un plan incliné est donné par:

$$G_{dir} = G_{dirh} * \cos\theta \tag{I.5}$$

θ: angle d'incidence des rayons solaires.

I.9.3 Le Rayonnement solaire diffus

C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples réflexions (dispersion) par les molécules et les aérosols de l'atmosphère ; pour un observateur au sol, le rayonnement diffus est un ensemble des directions rayonnées

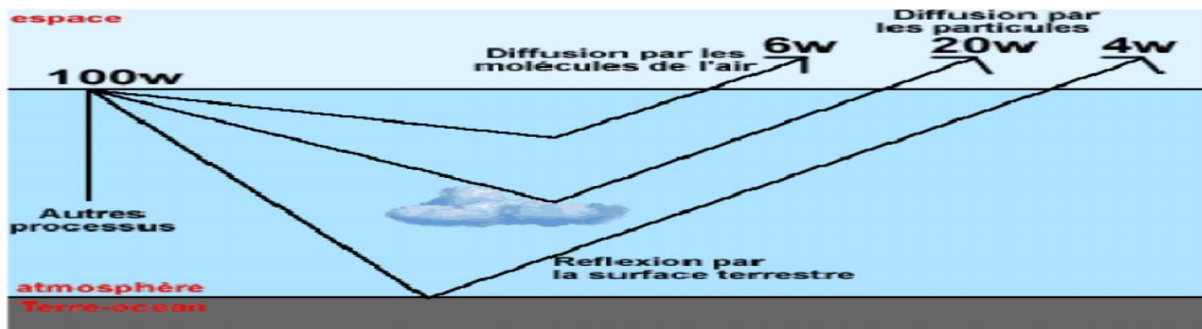


Figure I.6: Représentation des rayons diffus avec la puissance. Solaire incidente de 100watts

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voute céleste.

La relation entre le coefficient de transmission du flux direct et diffus est:

$$\tau_{dif} = 0.272 - 0.2939 * \tau_{dir} \quad (I.6)$$

Le flux diffus reçu sur un plan horizontal est défini par:

$$G_{difh} = C * \sin(h) * \tau_{dif} \quad (I.7)$$

Le flux diffus reçu sur un plan incliné est défini par:

$$G_{dif} = G_{dif1} + G_{dif2} \quad (I.8)$$

$$G_{dif1} = G_{difh} * \frac{1 + \cos(i)}{2} \quad (I.9)$$

$$G_{dif2} = alb * \frac{1 + \cos(i)}{2} * (G_{difh} * \sin(h) + G_{difn}) \quad (I.10)$$

G_{dif1} , G_{dif2} : rayonnements diffusés par le ciel et par le sol respectivement.

Alb: albédo du sol.

i: angle d'inclinaison du plan du capteur par rapport à l'horizontale.

L'albédo :

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

$$Alb = \frac{\text{Energie réfléchié}}{\text{Energie reçue}} \quad (I.11)$$

Ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul.

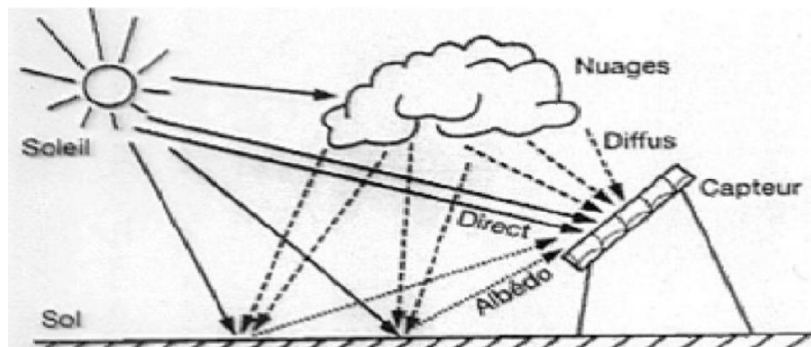


Figure I.7: Schéma descriptive

I.9.4 Le Rayonnement solaire réfléchi

C'est le rayonnement qui provient du sol par suite à la réflexion. Cette composante dépend de la nature du sol et de sa couleur.

I.9.5. Le rayonnement solaire global :

Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements diffus et direct:

$$G = G_{dir} + G_{dif} \quad (I.12)$$

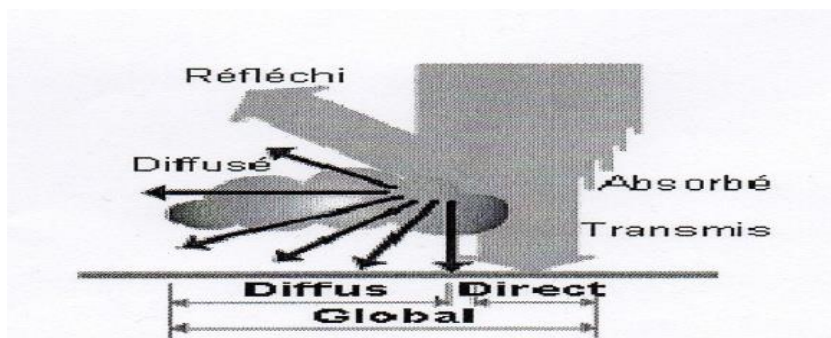


Figure I.8: Composantes du rayonnement solaire reçu au niveau du sol terrestre.

La somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffus constitue le rayonnement solaire global. Le rayonnement solaire global est composé de rayonnement de différentes longueurs d'onde et intensités figure 1.8.

I.10. Calcul de la position du soleil :

I.10.1. Les paramètres de position :

1. Les coordonnées géographiques :

Tout point de la surface de la terre est repéré par ses coordonnées géographiques [8],[9], [15]:

- ✓ La longitude (λ) est l'angle entre le plan méridien passant par ce lieu avec la méridienne origine de Greenwich, elle varie de -180° à $+180^\circ$ de l'ouest à l'est.
- ✓ La latitude (L) est l'angle avec le plan équatorial que fait le rayon joignant le Centre de la terre à ce lieu, elle varie entre $+90^\circ$ au pôle Nord et -90° au pôle Sud.
- ✓ L'altitude (Z) correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de Référence, le géoïde, figurant le niveau moyen de la mer.

La détermination de la direction du soleil sur la sphère céleste se fait par des Coordonnées célestes du soleil qui sont :

2. Les coordonnées célestes horizontales :

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles qui sont:

- ✓ L'azimut (a) est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil (figure I.5). Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = \cos(d) * \frac{\sin(w)}{\sin(h)} \quad (I.13)$$

- ✓ La hauteur du soleil (h) est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal (figure I.5), elle est donnée par la formule:

$$\sin(h) = \sin(L) * \sin(d) + \sin(L) * \cos(d) * \cos(w) \quad (I.14)$$

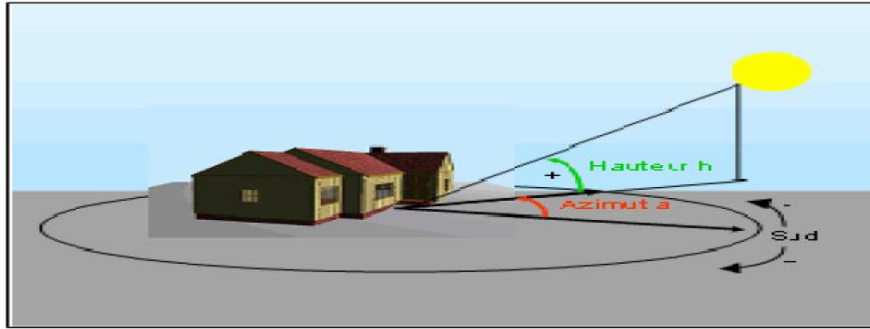


Figure I.9: Les coordonnées célestes horizontales

3. Les coordonnées célestes horaires :

- ✓ L'angle horaire (ω) est l'arc de la trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu, il augmente de 15° par heure.
- ✓ La déclinaison (d) est l'angle entre le plan de l'équateur terrestre avec la direction terre soleil. Elle varie suivant l'équation de Cooper (figure I.6):

$$d = 23.45 * \left[\frac{360}{365} * (n - 81) \right] \quad (I.15)$$

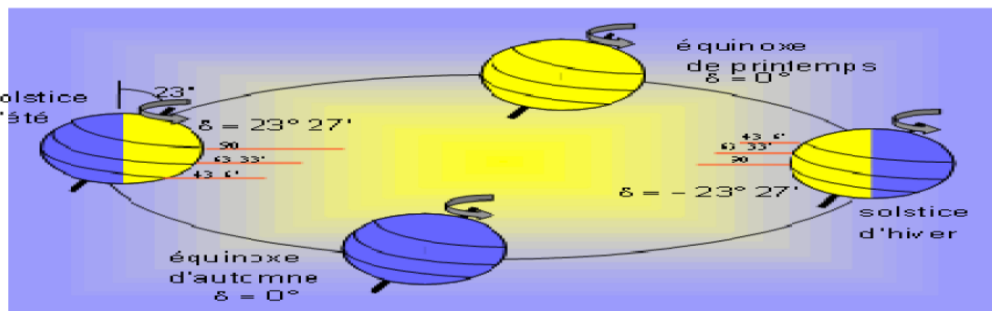


Figure I.10: Variation annuelle de la déclinaison solaire

I.10.2. Les paramètres de temps :

On distingue :

- ✓ Le temps solaire vrai (TSV) est l'angle horaire entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu considéré, il est donné par l'expression:

$$TSV = 12 + \frac{w}{12} \quad (I.16)$$

- ✓ Le temps solaire moyen (TSM) est donné par [1]:

$$TSV - TSM = ET \quad (I.17)$$

ET : est l'équation du temps qui corrige le TSV par rapport au TSM [1]:

$$ET = 9.87 * \sin(2 * N) - 7.53 * \cos(N) - 1.5 * \sin(N) \quad (I.18)$$

$$N = (n - 81) * \frac{360}{365}$$

- ✓ Le temps universel (TU) est le temps moyen de Greenwich [1]:

$$TU = TSM - \frac{\lambda}{15} \quad (I.19)$$

- ✓ Le temps local (TL) est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.20)$$

H : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

II.1 Energie solaire photovoltaïque

II.1.1 Introduction

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu. Dans le cadre de la concrétisation du programme national algérien des énergies renouvelables, un projet de 400 MW en photovoltaïque a été lancé, faisant partie du programme complémentaire de production de l'électricité, prévu pour l'été 2014. Ce projet consiste en la réalisation de 23 centrales solaires photovoltaïques, dans la région des hauts plateaux et dans la région du sud ouest; ainsi que dans la région du grand sud. Dans la dizaine d'années qui viendront, il est prévu la réalisation d'un parc d'énergies renouvelables de 5539 MW. L'objectif à 2030 est de 12 000 MW en énergies renouvelable pour la consommation interne d'électricité. La puissance photovoltaïque installée cumulée dans le monde a atteint 138,9 GW à la fin 2013.

II.1.2. Notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque :

II.1.2.1. Présentation:

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable. Elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque.

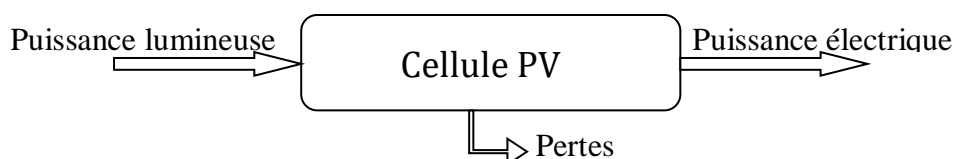


Figure II.1: Bilan de puissance d'une cellule PV.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est faible : inférieur à 20%

II.1.2.2. Définitions :

➤ *Cellules, panneaux et champs photovoltaïques :*

La cellule photovoltaïque est l'unité de base qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Un panneau photovoltaïque est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques. Parfois, les panneaux sont aussi appelés modules photovoltaïques.

Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site, on obtient un champ photovoltaïque.

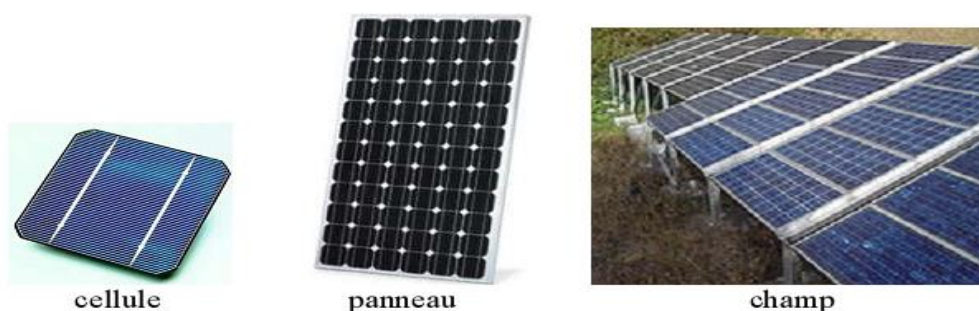


Figure II.2 : Cellule, Module, Champ PV.

➤ **Puissance lumineuse et éclairement :**

L'éclairage caractérise la puissance lumineuse reçue par unité de surface. Il s'exprime en W/m^2 . La grandeur associée à l'éclairage est notée G . Parfois, cette grandeur est aussi appelée irradiante.

II.1.3. Fabrication des cellules photovoltaïques :

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques.

II.1.4. Principe d'une cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -). Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +). La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique.

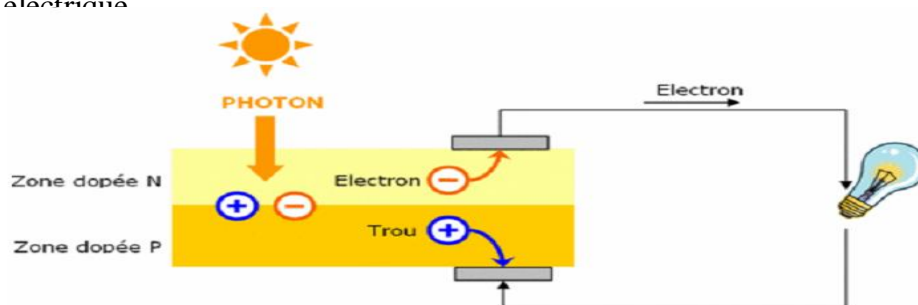


Figure II.3 : Constitution de la cellule PV.

II.1.5. Les différents types de générateurs photovoltaïques :

II.1.5.1. Silicium monocristallin

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques.

Pour les fabriquer, on fond du silicium en forme de barre. Lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Durée de vie : 20 à 30 ans.

• **Avantages :**

1. Bon rendement, de 12% à 18%

2. bon ratio Wc/m^2 (environ $150 Wc/m^2$) ce qui permet un gain de place si nécessaire
3. nombre de fabricants élevé

• **Inconvénients :**

1. Coût élevé
2. Rendement faible sous un faible éclairement.

II.1.5.2 Silicium polycristallin (multicristallin) :

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

• **Avantages :**

1. cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module
2. moins cher qu'une cellule monocristalline

• **Inconvénients :**

1. moins bon rendement qu'une cellule monocristalline : 11 à 15%
2. ratio Wc/m^2 moins bon que pour le monocristallin (environ $100 Wc/m$)
3. rendement faible sous un faible éclairement.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix). Durée de vie : 20 à 30 ans

II.1.5.3 Silicium amorphe :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

• **Avantages :**

1. Fonctionne avec un éclairement faible ou diffus (même par temps couvert)
2. un peu moins chère que les autres technologies
3. intégration sur supports souples ou rigides.

• **Inconvénients :**

1. Rendement faible en plein soleil, de 6% à 8%
2. nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio Wc/m^2 plus faible, environ $60 Wc/m$)
3. Performances qui diminuent avec le temps (environ 7%).

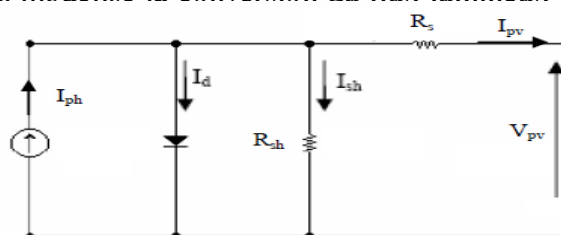
II.1.6 Modèle électrique de module photovoltaïque :

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant -tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par et le nombre de paramètres pris en compte.

II.1.6.1 Modèle à une diode :

Le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent (Figure II.5) qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique,

Figure II.4 : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.



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

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

Avec
$$I_{PV} = P_1 G [1 + P_2 (G - G_{ref}) + P_3 (T_j - T_{jref})] \quad (II.2)$$

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{A n_s k T_j} \right) - 1 \right] \quad (II.3)$$

$$I_{Rsh} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{I_{Rsh}} \quad (II.4)$$

La température du module peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T_j = T + G \left(\frac{Noct - 20}{800} \right) \quad (II.5)$$

Avec :

G_{ref}, T_{jref} : l'éclairement et la température de jonction sous conditions STC.

G, T_j : l'éclairement et la température de jonction dans les conditions de fonctionnement.

P_1, P_2, P_3 : paramètres constants.

NOCT: température nominale de fonctionnement du module, donnée par le constructeur.

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

n_s : nombre de cellule en série dans un module.

K : Constant de Boltzmann.

I_0 : le courant de saturation il est fortement dépendant de la température; il est donné par :

Avec :

E_g : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 ev.

La détermination des paramètres du modèle se fait par résolution numérique (moindres carrés) sous Matlab-Simulink. Les paramètres suivants ont été obtenus pour un panneau photovoltaïque de 110Wc [Iss 08].

Tableau.2: Paramètres de courant I_{pv} modèle à deux diodes.

R_s	R_{sh}	P_1	P_2	P_3	P_4
0.614	151.16	0.0036	0.0001	-0.0005	70.874

II.1.6.2 Modèle à deux diodes :

Le module photovoltaïque est représenté par son schéma électrique équivalent (Figure II.6) Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau.

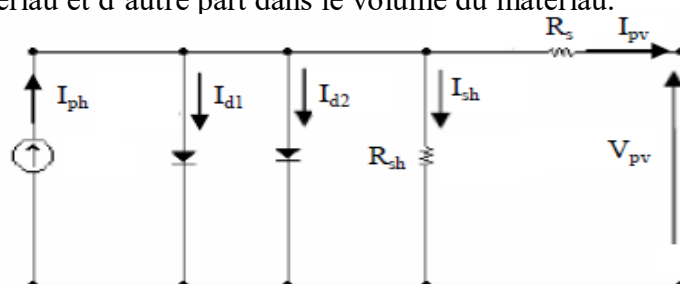


Figure II.5 : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

Exemple: Le tableau suivant donne les paramètres du modèle pour un panneau photovoltaïque de 110Wc. La détermination des paramètres se fait de la même manière que pour le modèle à une diode.

$$I_{PV} = I_{Ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{Rsh} \quad (II.6)$$

$$I_{d1} = I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{A \cdot n_s \cdot kT_j} \right) - 1 \right] \quad (II.7)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{2 \cdot A \cdot n_s \cdot kT_j} \right) - 1 \right] \quad (II.8)$$

$$I_{01} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(- \frac{E_g}{kT_j} \right) \quad (II.9)$$

$$I_{02} = P_5 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(- \frac{E_g}{2 \cdot kT_j} \right) \quad (II.10)$$

Tableau.2: Paramètres de courant I_{pv} modèle à deux diodes.

P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
0.0034	0	$0.2 \cdot 10^{-5}$	450	72

II.1.7 Caractéristiques électriques d'une cellule :

II.1.7.1 Caractéristiques courant / tension :

A température et éclairement fixés, la caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante :

Sur cette courbe, on repère :

- le point de fonctionnement à vide :
 U_V pour $I = 0A$
- le point de fonctionnement en court-circuit :
 I_{cc} pour $U = 0V$

Pour une cellule monocristalline de 10x10cm, les valeurs caractéristiques sont :
 $I_{cc} = 3A$ et $U_V = 0,57V$ ($G = 1000W/m^2$ et $\theta = 25^\circ C$).

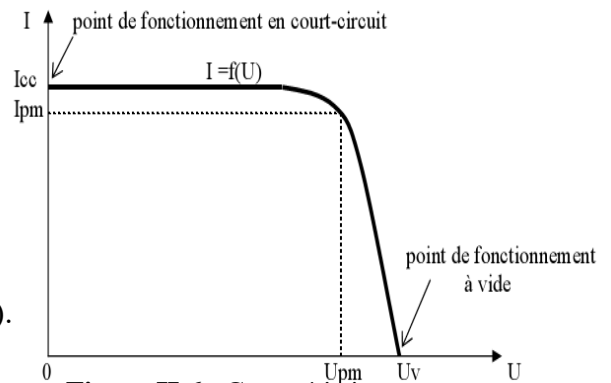


Figure II.6 : Caractéristique courant/tension d'une cellule PV.

II.1.7.2 Caractéristiques puissance / tension :

La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = U \cdot I$. Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(U)$.

Cette courbe a l'allure suivante

Cette courbe passe par un maximum de puissance (PM).

A cette puissance correspond, une tension U_{PM} et un courant I_{PM} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(U)$.

Pour une cellule monocristalline de 10x10cm, les valeurs caractéristiques sont :

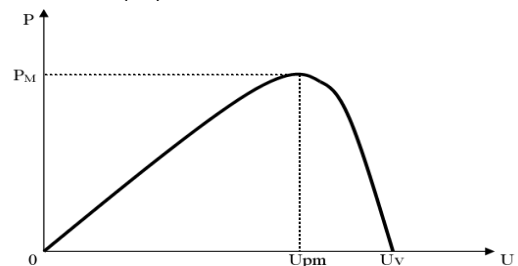


Figure II.7 : Caractéristique puissance/tension d'une cellule PV.

II.1.8 Amélioration du rendement d'une installation photovoltaïque :

II.1.8.1 Par l'utilisation d'un suiveur solaire (tracking system) :

Un suiveur solaire, ou solar tracker, permet à un module photovoltaïque de rester perpendiculaire au rayonnement solaire pendant la journée.

Si un module photovoltaïque reste perpendiculaire au rayonnement solaire pendant la journée sa productivité augmente :

- Avec un mouvement suivant l'azimut d'est en ouest la production peut croître de 27 à 32% par rapport à la production d'un module fixe.
- Avec un mouvement sur 2 axes, azimut et hauteur, l'augmentation de la production annuelle peu atteindre 40% par rapport à la production d'un module fixe.

En contre partie, il faut tenir compte du coût de l'investissement supplémentaire, la maintenance et l'énergie consommée pour le fonctionnement du système.

Les systèmes de poursuite sont aussi essentiels pour toutes les installations thermiques ou photovoltaïques à concentration.

II.1.8.2 Par une commande MPPT :

Même s'il est connu que les rendements sont relativement peu élevés (de l'ordre de 15 à 20%), la recherche de la puissance maximale est nécessaire. Or, les panneaux photovoltaïques sont soumis à des conditions changeantes au niveau de l'ensoleillement et de la température qui modifie la puissance extractible.

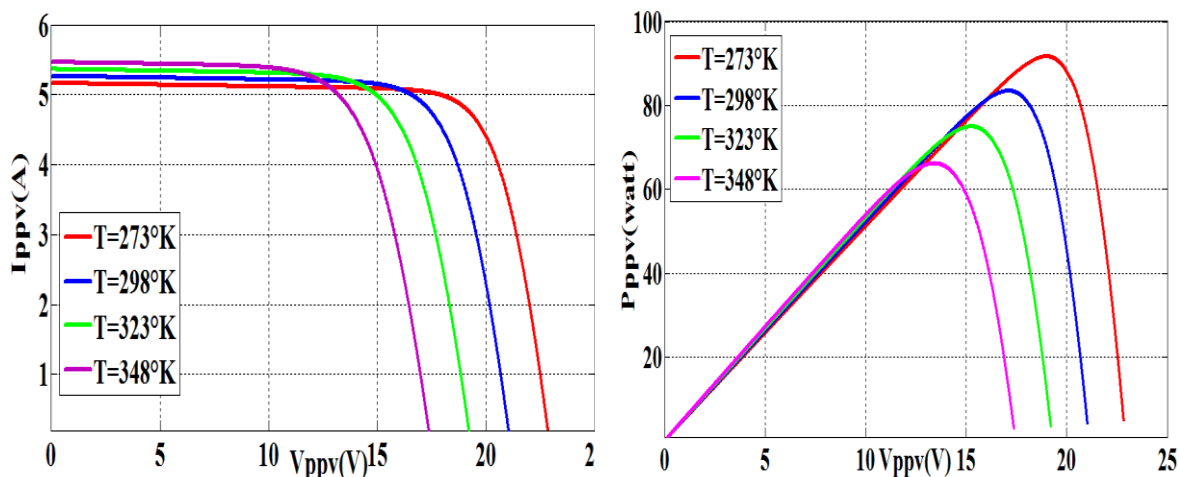


Figure II.8 : Caractéristique courant/tension et puissance/tension d'un panneau PV.

En effet, sous ces conditions changeantes, la puissance extractible est variable et fonction de la tension (ou du courant) imposée aux bornes du panneau photovoltaïque. Il est donc nécessaire que le système d'exploitation s'adapte pour extraire le plus de puissance possible : c'est ainsi que naît en quelque sorte l'idée de MPPT (Maximum Power Point Tracker).

1. MPPT par la méthode Perturbe and Observe (P&O) :

C'est l'algorithme le plus répandu, Perturbe and Observe (P&O) repose sur la perturbation [ici une augmentation ou une diminution] de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$).

Explication en utilisant la perturbation de V_{ref} :

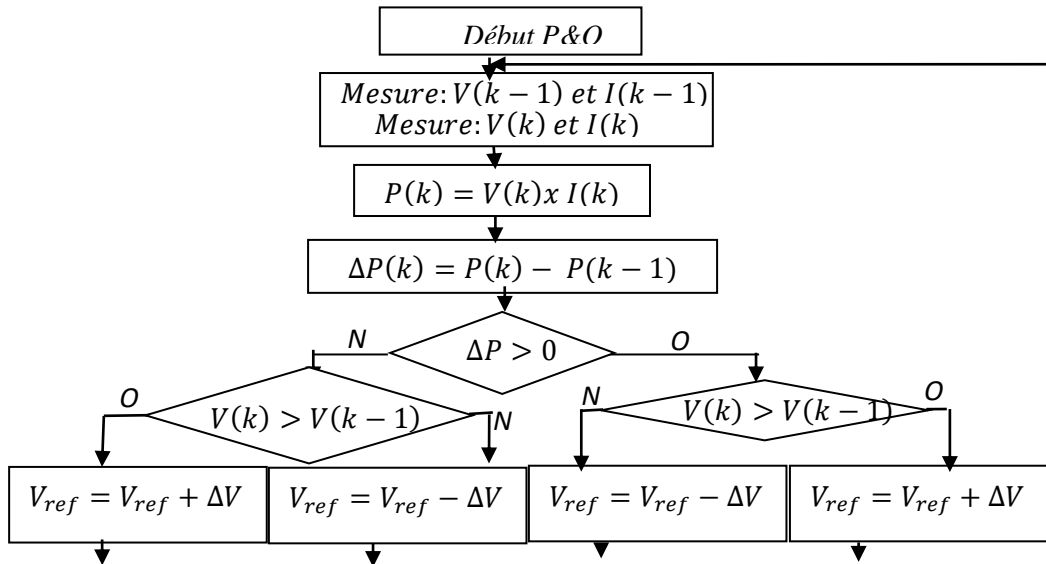


Figure II.9 : l'organigramme de la commande P&O.

Cette méthode de détermination du MPP (Maximum Power Point) est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit (short-circuit current) ou de la tension de circuit ouvert (open-circuit voltage) ainsi que sur l'utilisation de courbes Courant-Tension prédéfinies. C'est sur ces dernières qu'est lue la valeur optimale pour la tension ou le courant. Cette méthode présente deux avantages : la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations (même infimes) en état stationnaire. Cependant, ces points forts ne peuvent cacher le défaut intrinsèque de l'algorithme à savoir l'utilisation de courbes prédéfinies que ne sauraient refléter parfaitement les variations des conditions d'exploitations et donc permettre de toujours atteindre le maximum de puissance .

2. Approche Incrémental Conductance (InCond):

Cette approche se base sur l'observation de dP/dV . Lorsque cette dernière quantité atteint 0, cela signifie que la puissance extraite est sur l'unique extremum de la courbe et par conséquent au maximum de puissance extractible. Cette méthode est plus rapide que P&O mais elle présente de mauvais résultats pour de faibles ensoleillements (très faible évolution de P sur le pas de calcul fixe d'où des dérivées très petites et des difficultés d'interprétations) .

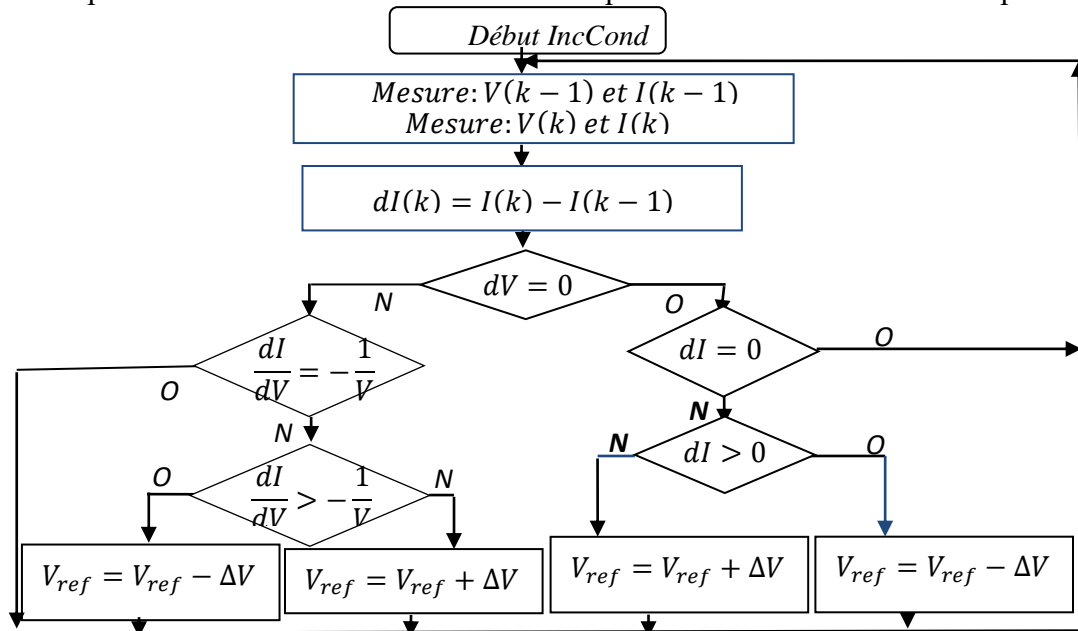


Figure II.10 : l'organigramme de la commande InCond.

II. Energie solaire thermique

II.2.1 Introduction :

L'utilisation de l'**énergie solaire thermique** comme source de chaleur se définit par la conversion du rayonnement solaire en chaleur, selon plusieurs niveaux de température. Un **fluide caloporteur**, enfermé dans des tubes ou canaux d'un absorbeur sélectif (échangeur type plaque), absorbe la chaleur du rayonnement solaire et la redistribue au réseau d'eau de chauffage par le biais d'un échangeur thermique.

L'énergie solaire thermique peut alimenter conjointement le chauffage d'un bâtiment et la production d'eau chaude sanitaire (ECS). Elle peut couvrir environ 40 % des besoins de chauffage, ou plus si le bâtiment est énergétiquement performant.

II.2.2 Différents types de capteurs solaires existent :

II.2.2.1 Les capteurs non vitrés :

Un capteur solaire non vitré, aussi appelé capteur "moquette", est composé :

- d'un absorbeur (métallique ou synthétique) revêtu d'une peinture sombre et sélective,
- d'un faisceau de tubes cylindriques ou ovalisés, résistants aux rayonnements ultraviolets et aux variations de température. Les tubes sont parcourus par de l'eau (fluide caloporteur). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes. Ces capteurs solaires ne sont généralement pas isolés. De ce fait, en sortie du capteur, l'eau n'excède pas 20°C.



Figure II.11 Capteur non vitré. Source ARPE / CES

II.2.2.2 Les capteurs plans:

Un capteur plan vitré est composé :

- d'un caisson, d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords,
- D'un film réfléchissant.
- d'un faisceau de tubes cylindriques.
- une surface absorbante placée à l'intérieur du coffre, un vitrage fixé sur le caisson

ils peuvent atteindre des températures de chauffe de 50 à 80 °C

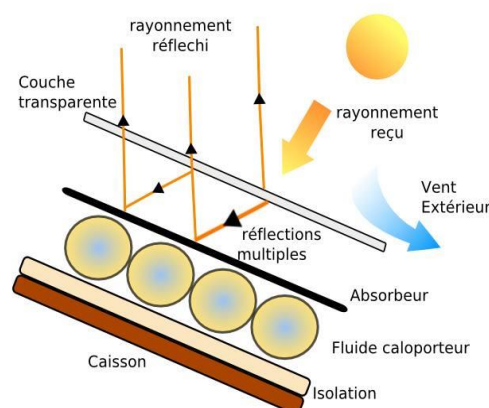


Figure II.12 Capteur plan.

II.2.2.3. Les capteurs sous vide:

Leur température de chauffe dépasse les 100-120 °C.

Un capteur solaire thermique sous vide est composé :

- d'une série de tubes de verre sous vide (il n'y a pas d'air),
- d'un absorbeur à l'intérieur des tubes de verre,
- d'un tube en cuivre à l'intérieur des tubes de verre.

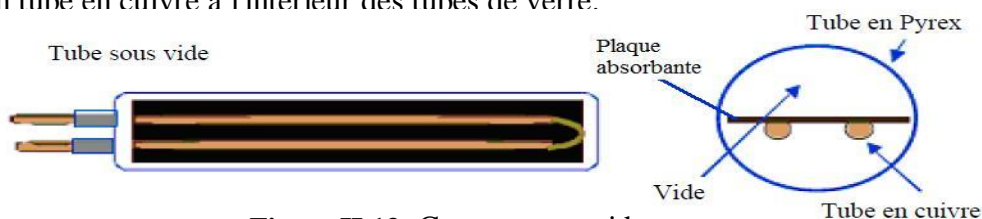


Figure II.13: Capteur sous vide.

II.2.2.4 Les capteurs à concentration

Ces capteurs sont plutôt utilisés dans le contexte d'applications industrielles, pour l'obtention de températures supérieures à 120 °C, ou pour la production d'électricité.

Un capteur solaire thermique à concentration est composé :

- d'un châssis,
- d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords,
- d'un système de réflexion de la lumière,
- d'un absorbeur,
- d'un réseau de tubes en cuivre.

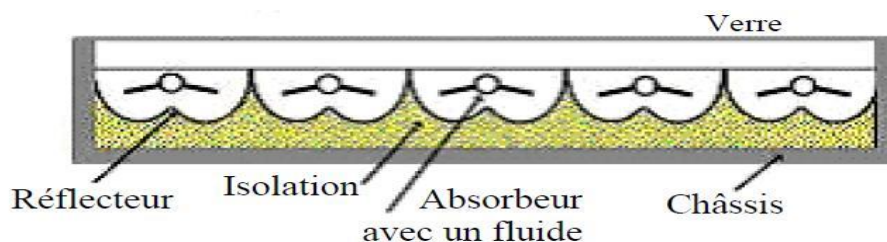


Figure II.14: Capteur à concentration.

II.2.3 Applications

II.2.3.1 Le four solaire :

Le principe utilisé est celui de la concentration des rayons par des miroirs réfléchissants. Les rayons solaires sont captés par une première série de miroirs orientables situés sur la pente, puis envoyés vers une deuxième série de miroirs (les « concentrateurs »), disposés en *parabole*. De là ils convergent vers une cible circulaire au sommet d'une tour centrale ; cette cible a à peine 40 cm de diamètre.

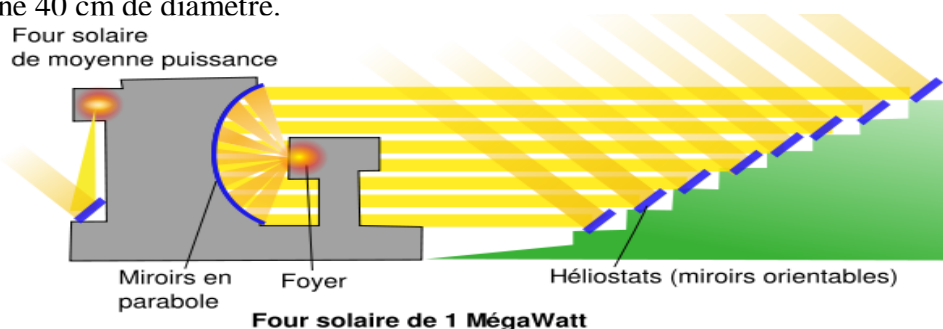
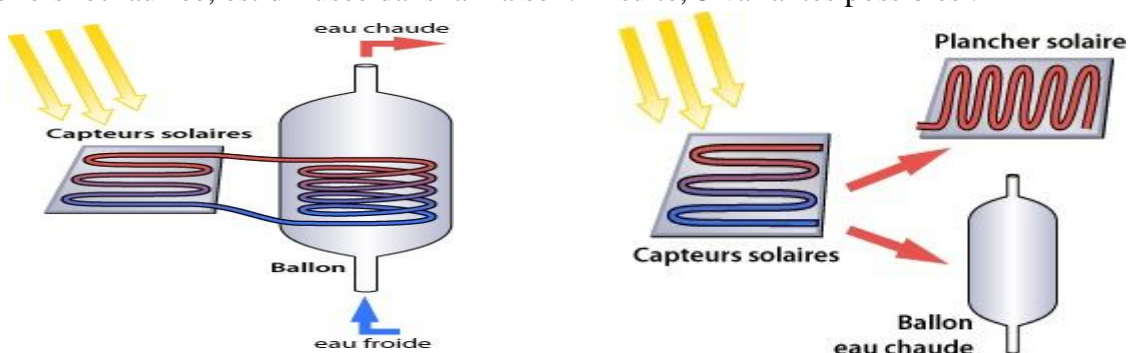


Figure II.10: Four solaire de 1Mégawatt.

II.2.3.2. Systèmes de chauffage solaire :

Le principe de base du chauffage solaire c'est comme suit: les capteurs ou panneaux solaires placés sur le toit ou dans le jardin contiennent de l'eau qui, une fois réchauffée, est diffusée dans la maison. Ensuite, 3 variantes possibles :



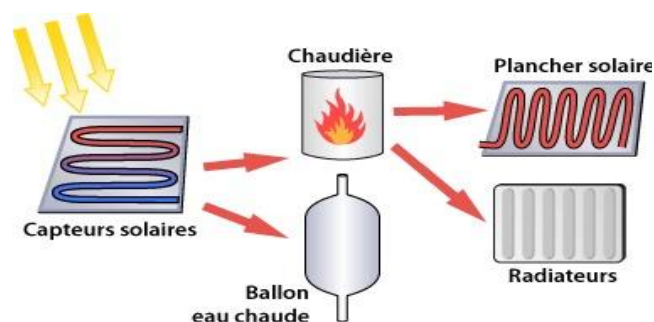


Figure II.16: Système de chauffage solaire.

II.2.4. Caractéristiques techniques des capteurs solaires :

Les capteurs sont caractérisés par :

- Leurs pertes optiques
- Leurs pertes thermiques

Ces pertes permettent par ailleurs de calculer le rendement global du capteur, pour une situation de fonctionnement donnée.

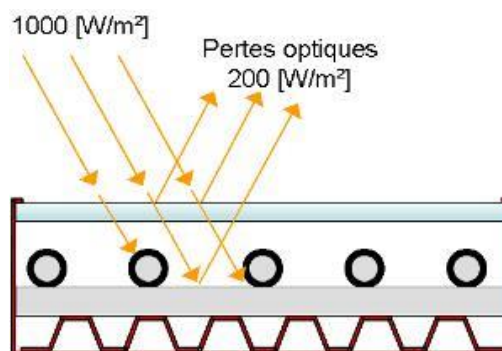
II.2.4.1. Les pertes optiques :

En premier lieu, les capteurs sont caractérisés par leur **rendement optique** (coefficient B). Le rendement optique du capteur représente le pourcentage de la puissance radiative du soleil qui sera réellement absorbée par le capteur.

Remarque : le rendement optique est parfois appelé rendement solaire. Il ne faut pas le confondre avec le rendement global du capteur qui ne peut se calculer que dans une condition de fonctionnement donnée.

Question: Quel est le rendement optique B du capteur ci-dessous ?

Le capteur ci-dessous transforme 1000 [W/m²] de rayonnement solaire en 800 [W/m²] de chaleur pour le fluide caloporteur. Son rendement optique B est donc de : $(1000 - 200) / 1000 = 80\%$



II.2.4.2. Les pertes thermiques :

Lorsque le fluide caloporteur qui circule dans le capteur s'échauffe, une partie de la chaleur reçue est perdue par convection et par rayonnement vers l'extérieur. Ces pertes sont caractérisées par un **coefficient k** (ou **a1**) exprimé en [W/m².°C]. Le coefficient k indique ces pertes thermiques en watts pour 1 [m²] de capteur et pour un [°C] d'écart de température entre le fluide caloporteur et l'air extérieur.

- Les capteurs plans bien isolés ont un coefficient k de l'ordre de 3 [W/m².°C]
- Les capteurs sous vide ont un coefficient k de l'ordre de 1 [W/m².°C] ils perdent environ 4 fois moins de puissance par convection et conduction pour un même écart de température entre le fluide et l'air extérieur que les capteurs plans.

Remarque :

- Le coefficient k (ou a_1) du capteur se rapporte à la surface **avant** du capteur.
- La norme européenne, EN 12975-1:2006 indique les caractéristiques minimales pour les capteurs fabriqués en Europe.

Caractéristiques thermiques Des capteurs solaires "Roth F2" (rapportées au m^2 de spécificité d'entrée) :

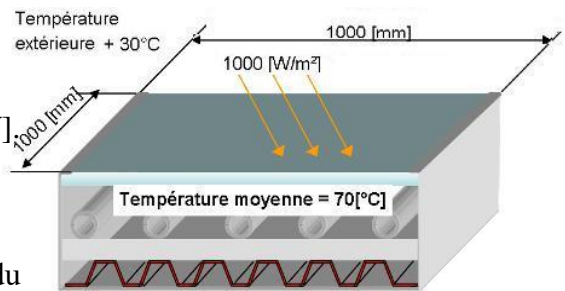
- Rendement optique, η_0 (sans dimension)=0,77.
- Coefficient de perte a_1 [w/m^2]=3,15.
- Température conventionnelle de stagnation, T_{stg} [$^{\circ}C$]=190

Question: Calculez la puissance réellement récupérée sur le capteur ci-dessous, sachant que son rendement optique est de 85% et son coefficient k de 3 [$W/m^2^{\circ}C$].

Réponse :

Le flux solaire reçu est de $1000 [W/m^2]$. La surface du capteur est de $1 [m^2]$. Il reçoit donc $1000 [W]$. Le rendement optique du capteur est de 85%. Donc $850 [W]$ sont récupérés par l'absorbeur au fond du capteur. Mais une partie de ces $850 [W]$ s'échappent vers l'extérieur du fait des pertes thermiques du capteur. L'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur du capteur est de $70 - 30 = 40 [^{\circ}C]$.

Les pertes thermiques du capteur sont donc de : $P = k \times S \times \Delta T = 3 \times 1 \times 40 = 120 [W]$. Alors, la puissance récupérée par le capteur est de : $850 - 120 = 730 W$



II.2.4.3. Le rendement global :

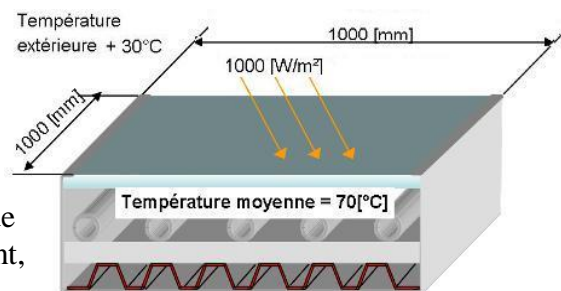
Le rendement global d'un capteur se calcule à partir des rendements optiques et thermiques dans **des conditions données** de fonctionnement du capteur.

On peut définir le rendement global du capteur comme le rapport entre l'énergie récupérée pendant un intervalle de temps donné et l'énergie solaire reçue par le capteur pendant le même intervalle de temps, dans des conditions données de fonctionnement stable.

Question: Quel est le rendement global du capteur solaire étudié dans l'exercice précédent ?

Réponse

Le capteur recevait un flux solaire de $1000 [W]$, mais du fait des pertes optiques et thermiques, seuls $730 [W]$ étaient au final récupérés par le fluide caloporteur. Dans ces conditions de fonctionnement, le rendement global était de 73%.



II.2.4.4 Calcul du rendement: (Méthode Française)

Dans la méthode française, la courbe de rendement d'un capteur est définie par l'équation suivante :

$$\eta = \beta - \frac{T_M - T_{EXT}}{P} \quad (II.11)$$

Avec :

- η : Rendement du capteur solaire (sans dimension)
- β : Facteur optique du capteur (sans dimension) entre 0.5 et 0.8
- K : Coefficient de déperdition du capteur ($W/m^2/^\circ C$)
- T_M : Température moyenne du fluide caloporteur du capteur solaire ($^\circ C$)
- T_{EXT} : Température extérieure ($^\circ C$)
- P : Eclairement solaire reçu par le capteur (W/m^2)

Type de capteur	Valeur du coefficient K
Capteur sans vitre	Entre 20 et 25
Capteur vitré simple	Entre 4 et 6
Capteur vitré sélectif	Entre 3 et 5
Capteur sous vide	Entre 1 et 3

III.1. Introduction

L'énergie éolienne ou énergie du vent est l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur. L'énergie éolienne est une **forme indirecte de l'énergie solaire**. L'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent.

L'énergie éolienne (du grec Eole, le dieu du vent) est l'énergie du vent. D'abord utilisée pour la navigation à voile dans l'Egypte ancienne, 3000 ans avant Jésus-Christ, elle donne ensuite naissance aux premiers moulins à vent dans les années 600, dans une région correspondant maintenant à l'Iran.

Le moulin à vent va peu à peu s'exporter en Europe, notamment en Grèce au 12^{ème} siècle, puis en Chine au 13^{ème} siècle. Il sert principalement à moudre le grain.

Dans les années 1700, les turbines éoliennes apparaissent au Canada grâce aux colons qui les utilisent pour irriguer les terres.

Avec l'arrivée de la construction métallique, le 19^{ème} siècle fait apparaître de nouveaux concepts et modernise le moulin. Le 20^{ème} siècle, en particulier à partir de la crise pétrolière des années 1970 qui ravive l'intérêt pour les énergies renouvelables, marque le développement de l'industrie éolienne, qui représente à la fin du siècle un chiffre d'affaires d'environ 7 milliards de dollars.

III.2. Les aérogénérateurs :

On utilise un, plus communément appelé « éolienne ». Son fonctionnement est simple et s'inspire de la technologie des moulins à vent.

La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent.

Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique (énergie que possède un corps du fait de son mouvement) du vent en énergie mécanique.

Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement.

Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Ainsi, le **multiplicateur** a pour rôle d'accélérer le mouvement lent des pales.

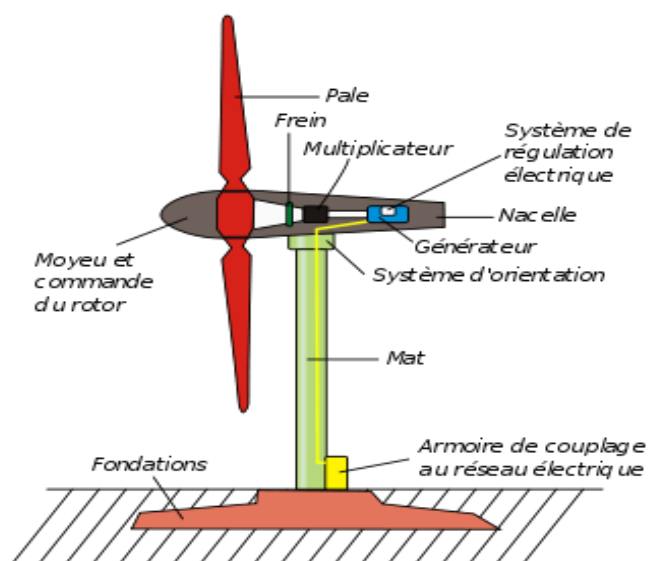


Figure III.1 Principaux composants qui constituent l'éolienne.

Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent comprises entre 14 et 90 km/h. Au-delà, elles s'arrêtent pour des raisons de sécurité. La production électrique varie selon la vitesse du vent. C'est avec des vents de 45 à 90 km/h que l'éolienne produit sa puissance maximale.

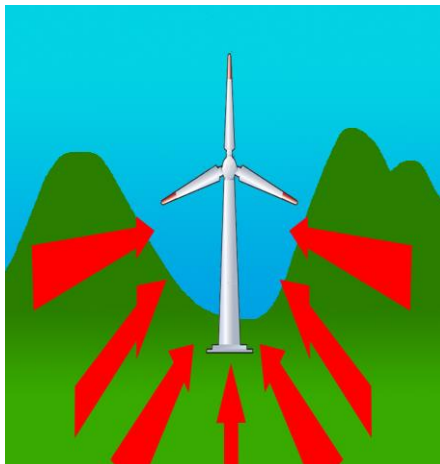
III.3. Emplacement des éoliennes :

Avant de décider d'installer un parc éolien, plusieurs études sont menées. La première étape consiste à s'assurer que le site d'implantation envisagé convient à un tel projet. Il doit en particulier :

- être **suffisamment venté**. Dans l'idéal, les vents doivent être réguliers et suffisamment forts, sans trop de turbulences, tout au long de l'année. Des études de vent sur le site sont donc indispensables ;
- être **facile à relier au réseau électrique** haut ou moyenne tension ; être facile d'accès.
- ne pas être soumis à certaines contraintes (aéronautiques, radars, etc...)
- être d'une taille suffisante pour accueillir le projet.

Cependant, il n'est pas interdit d'installer une éolienne hors de ces zones. Mais ces éoliennes ne seront pas forcément reliées au réseau électrique. Elles serviront par exemple à fournir de l'électricité à une exploitation agricole.

Les éoliennes en mer bénéficient de vents marins, donc plus forts et plus réguliers. Elles doivent être installées à plus de 30 km des côtes et à moins de 30 m de profondeur.



Effet tunnel



Effet colline

III.4. Puissance récupérable

La puissance du vent contenue dans un cylindre de section S est :

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.1})$$

avec :

ρ : masse volumique de l'air (environ $1,23 \text{ kg/m}^3$ à $15 \text{ }^\circ\text{C}$)

V : vitesse du vent en m/s

Formule de Betz

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. Albert Betz a démontré que l'énergie récupérable était maximale lorsque :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_{cinétique} = \frac{16}{27} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.2})$$

. Le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à **16/27**, soit environ 59,3 %. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

III.5. Les différents types d'éoliennes :

Deux types d'éoliennes domestiques peuvent vous être proposés :

III.5.1. L'éolienne horizontale :

C'est le modèle le plus répandu. Elle capte le vent (de face ou de dos selon le modèle) grâce à des pales assemblées en hélice. Celles-ci tournent autour d'un mât placé horizontalement par rapport au sol. Le générateur, actionné par la rotation de l'hélice, et situé en haut de l'éolienne. C'est la plus utilisée par les particuliers car son rendement est plus important.

III.5.2. L'éolienne verticale:

Les pales de l'éolienne verticale tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique. Elle peut capter des vents plus faibles ce qui lui permet d'être plus fréquemment exploitée. Elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale. Elle s'adapte donc mieux aux bâtiments. Elle peut fonctionner quel que soit le sens du vent. Par contre, elle produit moins d'électricité que l'éolienne horizontale.

Deux types d'éolienne à axe vertical : Darrieus et Savonius

➤ Les éoliennes verticales Darrieus :

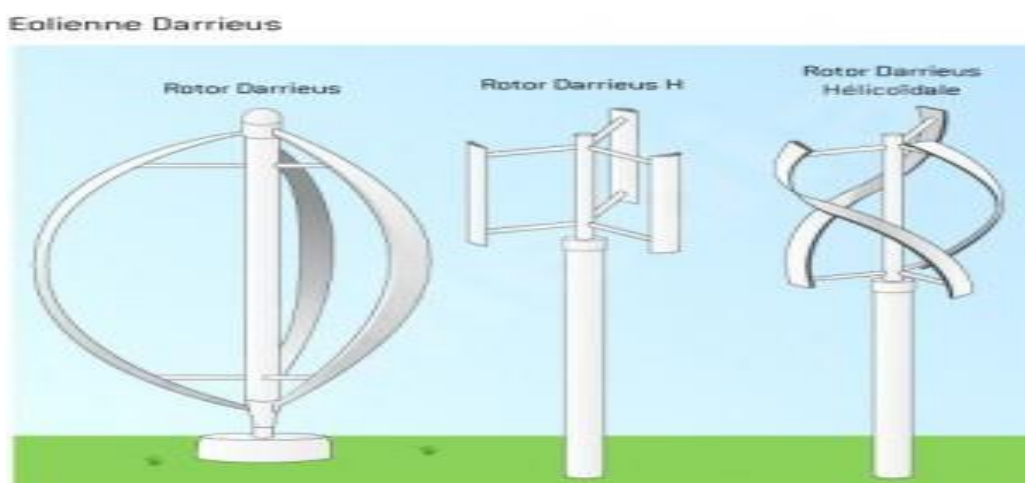


Figure III.2 Les éoliennes vertical.

Du nom de son inventeur, l'éolienne verticale de type Darrieus produit de l'électricité grâce à un rotor, qui tourne autour d'une tige fixe, appelée stator à ailettes.

Les avantages de l'éolienne verticale type Darrieus sont nombreux :

- Elle peut être installée dans des zones très venteuses, puisqu'elle peut subir des vents dépassant les 220 km/h.
- Elle émet moins de bruit qu'une éolienne horizontale et occupe moins de place.
- Autre aspect pratique, son générateur peut être installé en bas de celle-ci.

Les inconvénients de l'éolienne pour particulier verticale Darrieus sont un faible rendement et son démarrage difficile dû au poids du rotor sur le stator.

➤ Les éoliennes domestiques Savonius :

Du nom de leur inventeur, Sigurd Savonius qui a breveté ce système en 1929, l'éolienne verticale Savonius consiste en au moins deux demi-cylindres installés de manière légèrement désaxée l'un par rapport à l'autre. Le vent s'engouffre dans l'un des demi-cylindres et le pousse. Les demi-cylindres n'étant pas rattachés en un même point, mais légèrement désaxés, le vent continue sa course dans l'autre demi cylindre, qu'il pousse à son tour.

Les avantages de cette éolienne verticale sont :

- d'une part, son esthétisme et la possibilité de l'installer sur une toiture, d'autre part, le fait qu'elle fonctionne même avec un vent faible (contrairement au système Darrieus), quelle que soit sa direction. Comme l'éolienne type Darrieus, l'éolienne Savonius n'émet que peu de bruits, mais a un faible rendement.

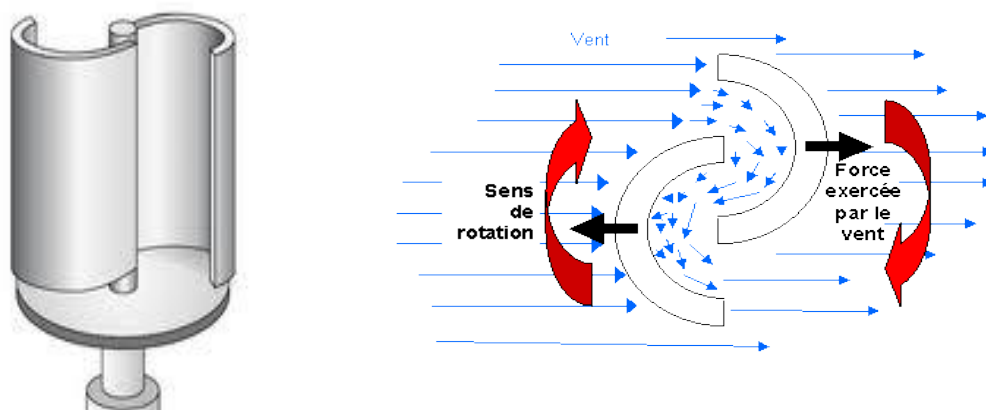


Figure III.3 Les éoliennes vertical de demi-cylindre.

III.5.3. Avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- Les propriétaires fonciers qui accueillent des éoliennes reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.

- Les éoliennes permettent grâce à la taxe professionnelle de participer au développement local des communes avec une contribution annuelle de l'ordre de 10 000 € par MW d'énergie éolienne produite (ce chiffre peut varier en fonction des communautés de communes concernées par les installations d'éoliennes).
- Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.
- Le prix de revient d'une éolienne a fortement diminué depuis 2011 suite aux économies d'échelle qui ont été réalisées sur leur fabrication.
- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.

III.5.4. Inconvénients:

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit, d'interférences électromagnétiques.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

IV.1. La géothermie

IV.1.1. Introduction

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.

IV.1.2. Origine de la géothermie

La chaleur de la Terre provient essentiellement (90%) de la désintégration d'éléments radioactifs (uranium, thorium, potassium) présents dans les roches et du noyau terrestre qui génère un flux de chaleur vers la surface.

La chaleur produite par les réactions nucléaires varie avec la composition chimique des roches mais aussi selon l'âge des roches, raison pour laquelle les gradients géothermiques sont plus élevés dans les plates-formes jeunes, comme en France et en Europe du Sud, que dans les socles anciens, comme en Scandinavie.

Plus la profondeur est grande et plus la chaleur est élevée, elle augmente en moyenne de 3,3°C tous les 100m (cet accroissement de température avec la profondeur est appelé « gradient géothermal »), mais ces valeurs peuvent être nettement supérieures dans certaines zones instables du globe et même varier de façon importante dans des zones continentales stables.

IV.1.3. Le Gradient géothermique

Le gradient géothermique correspond aux variations de températures en fonction de la profondeur les mesures des températures dans les mines et les forages profonds montrent que la température augmente de 3°C tous les 100 mètres dans la croûte continentale, ce gradient n'est pas aussi fort dans toutes les couches terrestres, le gradient est également plus fort au niveau des zones du globe (dorsales)

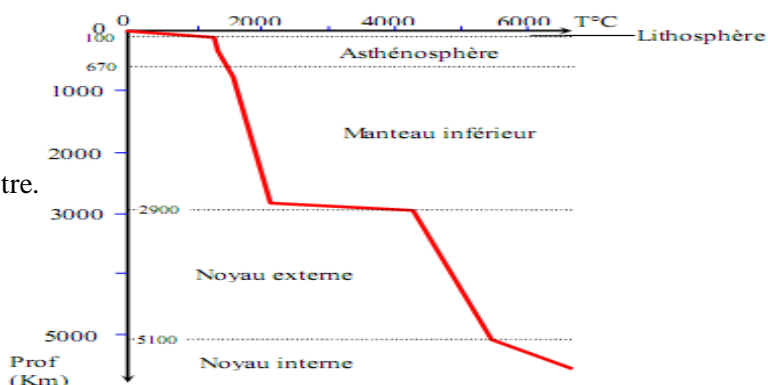


Figure IV.1.1: La géothermie terrestre.

IV.1.4. Caractéristiques générales de la géothermie

1. la géothermie très basse température : exploite des réservoirs situés à moins de 100m et dont les eaux ont une température inférieure à 30°C ; on l'utilise pour le chauffage et la climatisation grâce à une pompe à chaleur.

2. la géothermie basse énergie : utilise des aquifères à des températures comprises entre 30°C et 100°C, on l'exploite dans des réseaux de chaleur pour le chauffage urbain ou dans le cadre de procédés industriels.

3. la géothermie moyenne et haute énergie (jusqu'à 250°C) est utilisée pour produire de l'électricité via des turbines

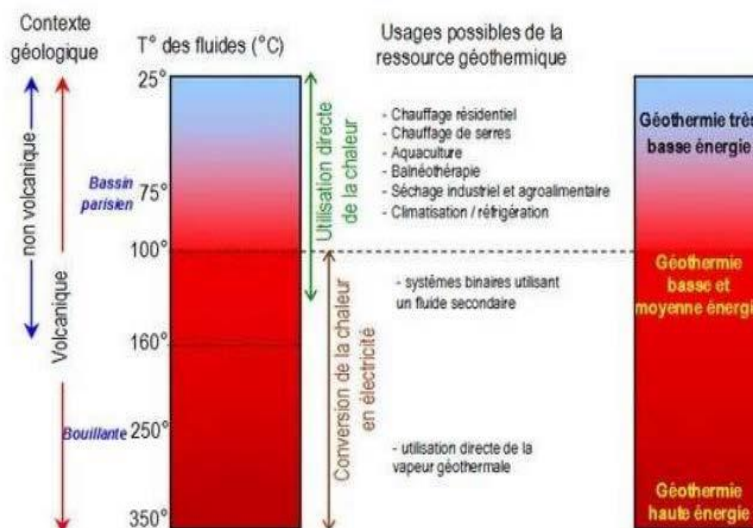


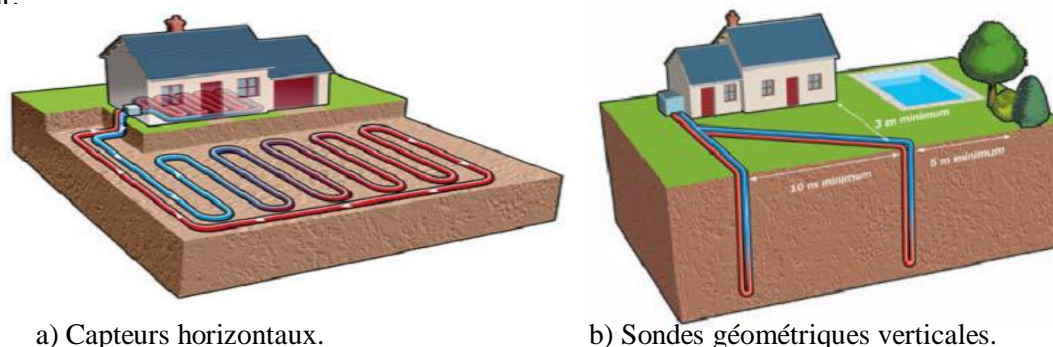
Figure IV.1.2: Géothermie : principaux usages en fonction du contexte géologique.

IV.1.5. La géothermie très basse température

La chaleur des roches du sous-sol ou des nappes peu profondes avec une eau à une température basse (moins de 40 °C) peut être récupérée et utilisée pour le chauffage d'habitations. On parle alors de géothermie de très basse énergie.

Pour récupérer la chaleur des sous-sols, on emploie des capteurs géothermiques enterrés, capables de prélever la chaleur des terrains qu'ils traversent et couplés à des pompes à chaleur (PAC). De telles installations sont souvent à la portée de particuliers propriétaires d'une maison individuelle.

Il existe des capteurs enterrés horizontalement (Figure 4.2a) à faible profondeur (0,60 m à 1,20 m) dont l'installation nécessite une surface de terrain équivalant à 1,5 voire 2 fois la superficie habitable à chauffer. Dans les zones urbanisées, où l'espace disponible au sol est souvent réduit, on utilise de préférence des capteurs enterrés verticalement (entre 30 et 150 m de profondeur) ou des sondes géothermiques (Figure 4.2b). Dans les deux cas, les capteurs sont composés de tubes enroulés sur eux-mêmes. Dans ces tubes, circule de l'eau mélangée à un antigel. Une fois réchauffée au contact du sous-sol, cette eau remonte en surface et fait fonctionner une PAC. La chaleur ainsi récupérée alimente le plus souvent un plancher chauffant.



a) Capteurs horizontaux.

b) Sondes géométriques verticales.

Figure IV.1.3: Capteurs géométriques enterrés.

IV.1.6. La géothermie basse température

La géothermie basse température (ou basse énergie) exploite la chaleur de gisements d'eau situés à des profondeurs de quelques centaines de mètres jusqu'à environ 2 000 m, pour des températures généralement comprises entre 30°C et 90°C.

La géothermie basse énergie s'appuie, elle, sur des aquifères à des températures comprises entre 30° et 100°C. On l'exploite dans des réseaux de chaleur pour le chauffage urbain ou dans le cadre de procédés industriels, par exemple.

La géothermie basse température fonctionne sur le principe du doublet géothermique (capteurs verticaux sur nappe phréatiques) comme illustré sur la figure 4.3. La température de l'eau est assez élevée pour se passer d'une pompe à chaleur. Il est en effet possible de chauffer directement des logements avec cette température via des réseaux de chaleur.

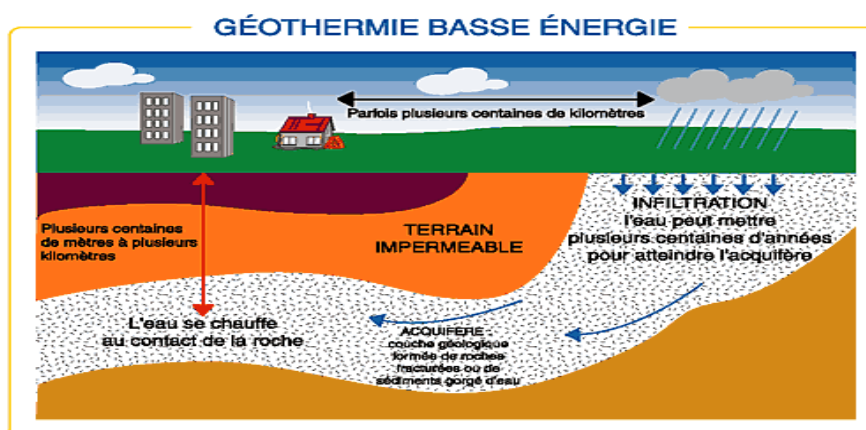


Figure IV.1.4 : Capteurs géométriques enterrés.

1. Avantages

- La technologie est simple et bien maîtrisée
- La France dispose d'un gisement de géothermie basse température intéressant
- Aucun fluide frigorigène n'est nécessaire pour l'exploiter
- Il y a peu de consommations électriques nécessaires à l'installation (uniquement des circulateurs)
- Les réseaux de chaleur s'inscrivent naturellement dans les schémas des éco-quartiers, tout comme les chaudières à biomasse

2. Inconvénients

- Les forages coûtent très chers
- Certaines régions de France sont moins concernées par cette technologie (sous-sol peut favorable)

IV.1.7. La géothermie moyenne et haute énergie

Cette technologie nécessite des sols particuliers où la température est naturellement élevée (>150°C), c'est le cas notamment des zones volcaniques où la température de sous-sol peut augmenter de 1000°C/100m. C'est d'ailleurs pour cela que la géothermie moyenne/haute température n'existe à l'heure actuelle qu'en Guadeloupe (pour la France) (Figure 4.4). L'île produit plus de 15 MW et 90GWh/an (6-7% de la production de l'île) grâce à sa centrale La Bouillante et ses 4 unités, qui sont toujours en expansion.

La géothermie haute température consiste là encore à un doublet géothermique. A ces profondeurs, l'eau pompée est supérieure à 200°C.

1. Avantages

- Les puissances produites peuvent être importantes
- La technologie de production d'électricité est bien maîtrisée (turbine/alternateur)

2. Inconvénients

- Seules les régions volcaniques sont pour l'heure concernées par la géothermie moyenne/haute température
- Le coût des forages très élevé
- Les forages doivent être bien réfléchis pour préserver la ressource en eau souterraine et ne pas la polluer.

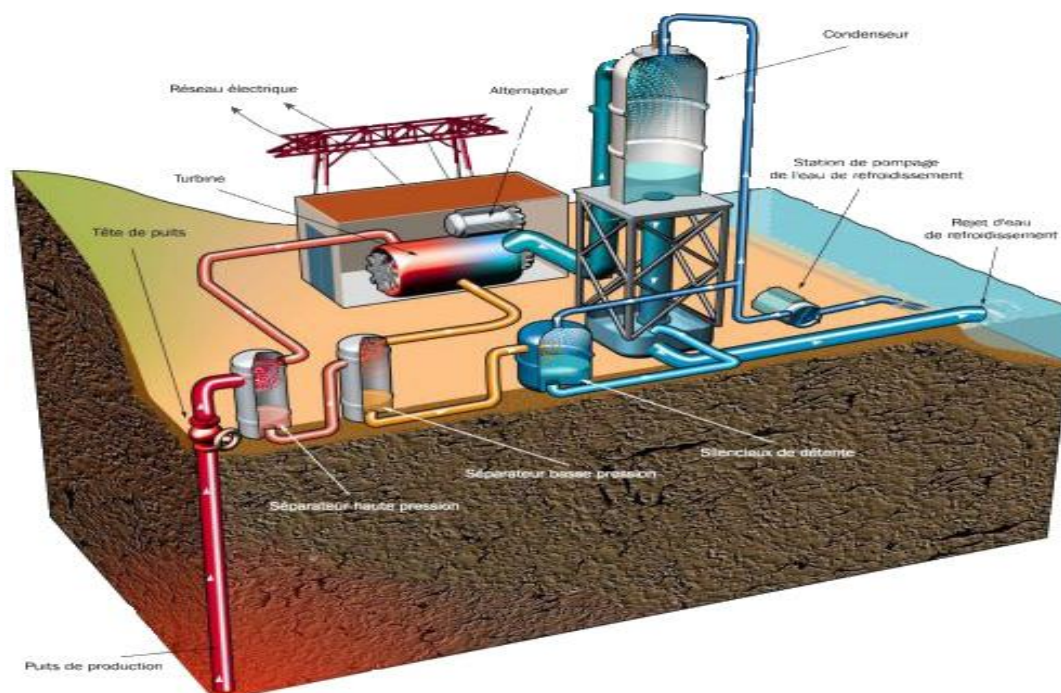


Figure IV.1.5 : Schéma de la centrale géothermique de la Bouillante (Guadeloupe)

IV.1.8. Le flux géothermique ou flux de chaleur

Le Flux géothermique ou flux de chaleur est la quantité d'énergie évacuée par la Terre, exprimée par unité de surface et par unité de temps.

Le flux thermique en un point donné est obtenu en multipliant la conductivité thermique et le gradient thermique. Il dépend de la radioactivité des roches et du refroidissement de la chaleur initiale de la terre par cristallisation du noyau terrestre et il est variable suivant le contexte. Le flux moyen est de 65 W/m² à la surface des continents et de 101 W./m² à la surface du plancher des océans soit 87 W/m² pour l'ensemble du globe.

IV.2. L'énergie hydraulique:

IV.2.1. Introduction

L'énergie hydraulique consiste à utiliser l'eau comme source d'énergie pour produire de l'électricité. Elle est plus respectueuse de l'environnement que les combustibles fossiles, comme le charbon ou le gaz, parce qu'elle ne cause aucune pollution. Cette source d'énergie renouvelable exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins

IV.2.2. Les roues hydrauliques

. Il s'agit d'une roue munie de palettes tout autour ; au contact du courant, la pression de l'eau sur les palettes fait tourner la roue.



Figure IV.2.1: Roue hydraulique.

IV.2.3. L'énergie des marées

On stocke l'eau de la marée montante dans un bassin. Puis à marée basse, l'eau retenue était libérée pour faire tourner la roue du moulin.

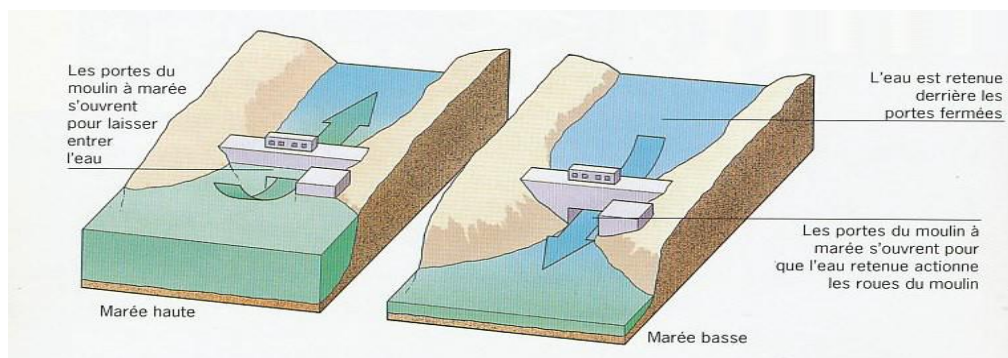


Figure IV.2.2: L'énergie des marées.

IV.2.4. Les centrales hydrauliques

Le déplacement de l'eau constitue une énergie les centrales hydrauliques produisent de l'électricité à partir de cette énergie. L'eau est canalisée jusqu'à une turbine. Sous la pression de l'eau sur les ailettes, la turbine se met à tourner et entraîne un générateur qui produit de l'électricité. Plus les générateurs tournent vite, plus ils fournissent d'électricité. La vitesse de la turbine, et par conséquent la quantité d'électricité produite par le générateur qu'elle actionne, dépendent de la pression de l'eau. Plus cette pression est grande et plus la turbine tourne vite. Une centrale hydraulique est alimentée par une retenue d'eau. Un barrage est établi à travers une vallée pour accumuler un grand volume d'eau.

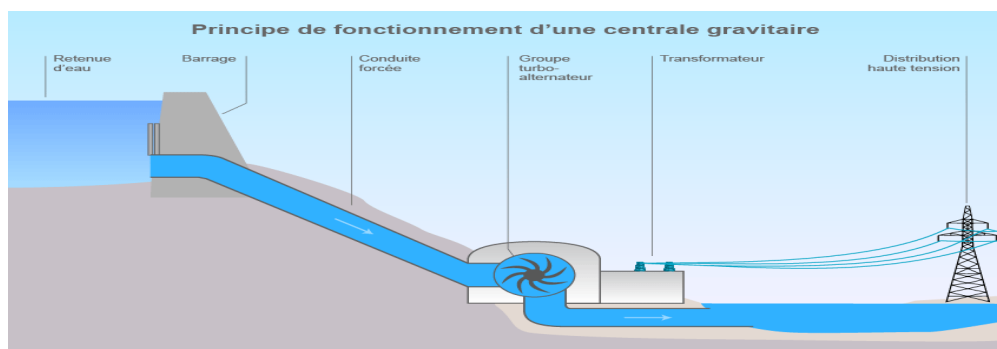


Figure IV.2.3: Centrale hydraulique gravitaire.

1. La retenue de l'eau:

Le barrage retient l'écoulement naturel de l'eau. De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue

2. La conduite forcée de l'eau:

Une fois l'eau stockée, des vannes sont ouvertes pour que l'eau s'engouffre dans de longs tuyaux métalliques appelés conduites forcées. Ces tuyaux conduisent l'eau vers la centrale hydraulique, située en contrebas.

3. La production d'électricité:

À la sortie de la conduite, dans la centrale, la force de l'eau fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. La puissance de la centrale dépend de la hauteur de la chute et du débit de l'eau. Plus ils seront importants, plus cette puissance sera élevée.

4. L'adaptation de la tension:

Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à très haute et haute tension. L'eau turbinée qui a perdu de sa puissance rejoint la rivière par un canal spécial appelé canal de fuite

IV.2.5. Les différents types de centrales:

1. Les centrales de basse chute : moins de 40m se trouvent souvent sur les grands fleuves ou les grandes rivières et fonctionnent au fil de l'eau avec un débit important. Elles produisent sans interruption

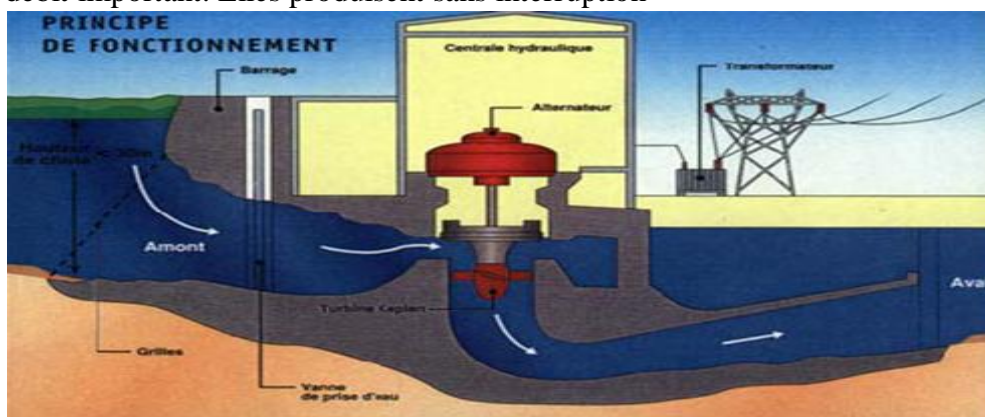


Figure IV.2.4: Centrale hydraulique de basse chute.

Les usines de basse chute sont équipées soit de turbine à réaction type KAPLAN avec pales orientables en fonction du débit, soit de groupes bulbes.

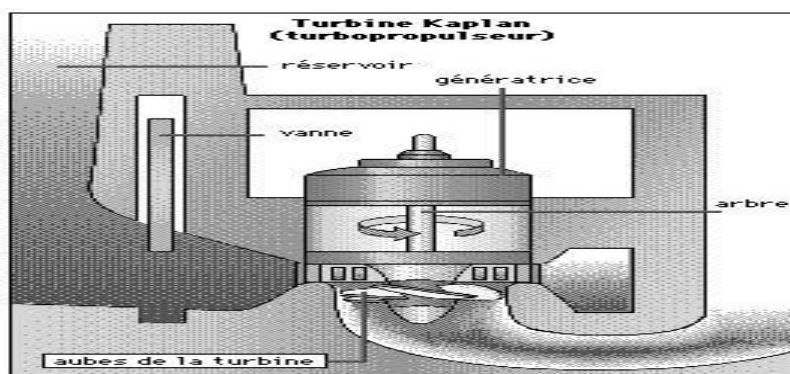


Figure IV.2.5: Système mécanique du central hydraulique de basse chute.

2. Les centrales de moyenne chute :

Se trouvent en moyenne montagne, avec des chutes allant de 30 à 300 mètres, elles utilisent les réserves d'eau accumulées sur des courtes périodes. Ces centrales servent pour la régulation journalière ou hebdomadaire de la production.

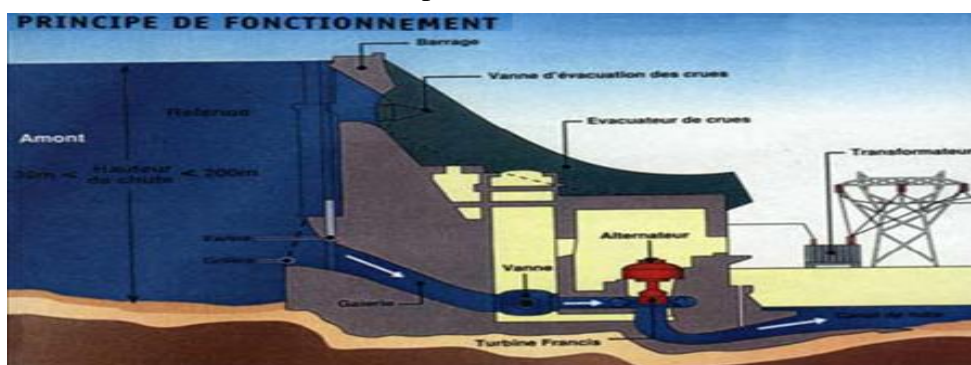


Figure IV.2.6: Centrale hydraulique de moyenne chute.

Les usines de moyenne chute sont équipées de turbine FRANCIS, ou turbine à réaction, qui permettent l'utilisation de l'eau à moyenne pression. L'eau est dirigée contre les pales de la turbine par des ailettes de guidage, puis rabattue vers le centre de la roue.

3. Les centrales de haute chute :

Se trouvent en altitude, avec des chutes supérieures à 300 mètres. Leur rapidité de démarrage permet de répondre aux consommations, notamment en hiver.

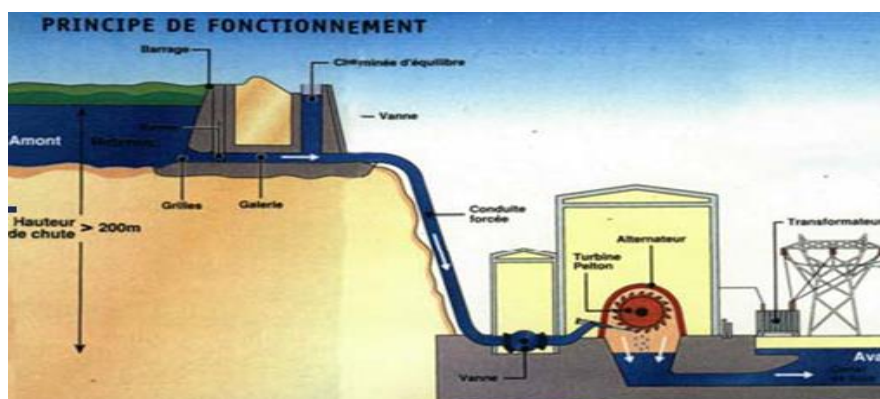


Figure IV.2.7: Centrale hydraulique de haute chute.

Les usines de haute chute sont généralement équipées de turbines PELTON, ou turbine à action : l'eau arrive en deux jets de forte pression contre le pourtour de la roue équipée de pales en forme de godets.

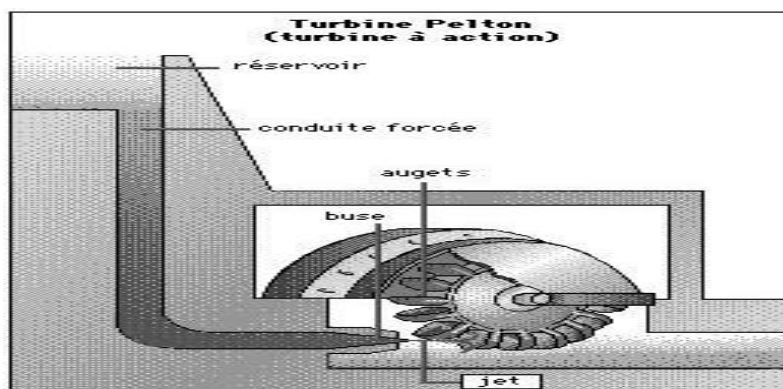


Figure IV.2.8: Système mécanique du central hydraulique de haute chute.

a. Principe

L'énergie hydroélectrique nécessite un cours d'eau ou une retenue d'eau. La centrale exploite l'énergie potentielle créée par le dénivelé de la chute d'eau. La centrale se compose d'un réservoir, d'une chute d'eau caractérisée par sa hauteur. L'énergie hydraulique est convertie en électricité par le passage de l'eau dans une turbine reliée à un alternateur. La puissance de la centrale dépend également du débit d'eau

b. Les énergies sont produites par les centrales hydrauliques :

Il existe quatre énergies sont produites par les centrales hydrauliques :

- L'énergie potentielle (hydraulique) due au poids et a la poussée de l'eau sur la paroi du barrage.
- L'énergie cinétique est due à l'augmentation de la vitesse et au changement de pression pendant la chute fluide.
- L'énergie mécanique est produite par le mouvement de la machine (turbine).
- L'énergie électrique est créée grâce à l'alternateur et le transformateur.

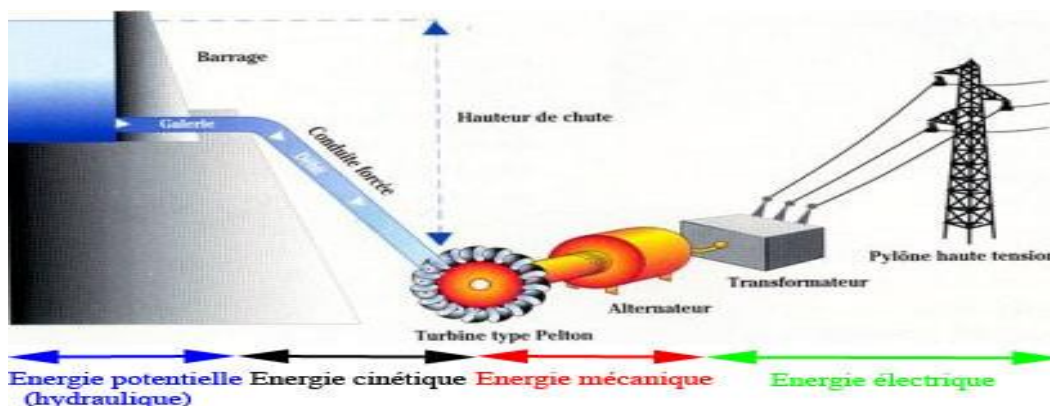


Figure IV.2.9: Chaîne de production d'énergie hydraulique.

c. Turbine et alternateur

L'eau qui arrive à grande vitesse fait tourner une turbine qui à son tour fait tourner un axe qui entraîne une rotation de l'alternateur. L'énergie produite par celle-ci est amenée vers un transformateur.

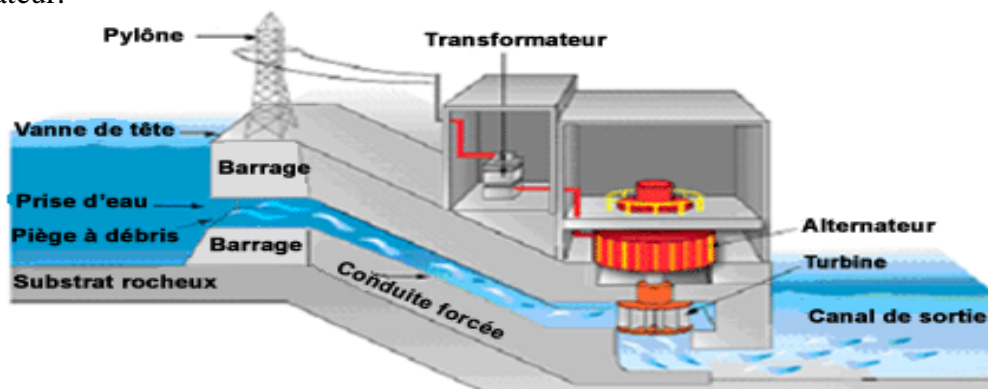


Figure IV.2.10: Système mécanique utilisé dans la production d'énergie hydraulique.

d. Groupe turbine-alternateur

Le rôle de la turbine est de transformer l'énergie de l'eau, de la vapeur ou du vent en énergie mécanique, de manière à faire tourner un alternateur. L'alternateur, à son tour, transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans le cas des centrales

hydroélectriques, on appelle groupe turbine-alternateur la turbine et l'alternateur qui fonctionnent ensemble.

- *La turbine tourne à cause du mouvement de l'eau.*

L'eau parvient au groupe turbine-alternateur par la conduite forcée qui l'achemine à la bêche spirale (conduit en colimaçon). Elle fait tourner les aubes et se dirige ensuite vers l'axe de la turbine pour s'écouler dans l'aspirateur situé en dessous. L'énergie mécanique produite par la puissante pression exercée par l'eau sur la turbine est transmise à l'alternateur qui la transforme en énergie électrique.

- *Entraîné par la turbine, l'alternateur génère un courant alternatif.*

L'alternateur, relié à la turbine par l'arbre de couche, est formé d'une partie mobile, appelée rotor, et d'une partie fixe, appelée stator. La paroi externe du rotor est composée d'électroaimants, tandis que la paroi interne du stator consiste en un enroulement de barres de cuivre. Lorsque le rotor tourne dans le stator, les électrons présents dans les barres de cuivre «vibrent ». Le mouvement des électrons crée un courant électrique.

- *Les turbines ont une vitesse de rotation constante.*

Il est impératif que tous les groupes turbines-alternateurs d'un réseau soient rigoureusement synchronisés, c'est-à-dire qu'ils maintiennent très exactement leur vitesse de rotation. Pourquoi ? Afin de produire une énergie électrique de qualité. Les appareils qui consomment de l'électricité sont conçus en fonction d'un courant alternatif dont la fréquence est précise. Cette fréquence dépend de la vitesse de rotation du groupe, c'est-à-dire du nombre de fois par seconde que les aimants du rotor passent devant les barres de métal conductrices du stator. Cette fréquence s'exprime en cycles par seconde ou hertz (Hz), du nom du physicien allemand Heinrich Hertz, qui démontra l'existence des ondes radio.

- *Force de l'eau*

Pour que la force motrice de l'eau soit suffisante pour faire tourner la turbine d'une centrale hydroélectrique, il faut que le débit du cours d'eau soit assez important et que sa hauteur de chute soit assez élevée. Le débit correspond au volume d'eau qui s'écoule pendant une période donnée, en général une seconde. La hauteur de chute est la différence d'élévation entre un point en amont (la prise d'eau) et un point en aval (le canal de fuite). Plus la hauteur de chute est importante, plus l'eau descend rapidement et exerce de la force sur la turbine. C'est pourquoi on construit des ouvrages de retenue sur certains cours d'eau afin d'accroître la hauteur de chute de ceux-ci.

IV.2.6. Avantages

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

IV.2.7. Inconvénients

- Impact sur le paysage (ex: barrage)
- Dépend des conditions météo (pour les installations au fil de l'eau)
- L'installation doit s'adapter à chaque site
- Pas toujours conciliable avec l'écosystème

IV.3. La Biomasse

IV.3.1. Introduction

La Définition donnée par l'INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques). La biomasse est l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale pouvant devenir des sources d'énergie. Elles peuvent être utilisées soit directement (bois énergie) soit après une méthanisation de la matière organique (biogaz) ou de nouvelles transformations chimiques (biocarburant). Elles peuvent aussi être utilisées pour le compostage".

D'où provient la biomasse?

Les principales provenances de la biomasse sont: la forêt, agriculture, les milieux marines et aquatiques, les haies, les parcs et jardins (déchets verts), les industries et activités humaines ayant traité de la matière d'origine vivante, y compris du bois (industries agro-alimentaires, papetières, de transformation du bois, etc.) et générant des coproduits, des déchets organiques (notamment les boues de stations d'épuration ou les sous-produits animaux) ou des effluents d'élevages. La biomasse provient de l'énergie solaire par photosynthèse. Deux sources principales peuvent être utilisées :

- Les déchets organiques provenant de la consommation domestique, de l'industrie ou de l'agriculture.
- les plantes énergétiques dédiées (agricoles ou forestières) pour produire de l'énergie



Figure IV.3.1: Schéma générale de production de la biomasse.

IV.3.2. Les applications de la biomasse

Que peut-on faire à partir de la biomasse ?

Les applications de la biomasse sont multiples et souvent anciennes. Hormis les Usages alimentaires et pour la fumure des champs, la biomasse a de tout temps été Utilisée comme combustible et comme matériau. Les applications de la biomasse Comme matière première de la chimie et comme carburant, importantes au XIXème et au début du XXème siècle, redeviennent attractives, avec la hausse du Prix du pétrole.

- La biomasse comme bio combustible pour produire de la chaleur et de L'électricité
- La biomasse comme matière première de la chimie
- La biomasse pour les biocarburants

IV.3.2.1 La biomasse comme biocombustible pour produire de la Chaleur et de l'électricité La vapeur d'eau dégagée par la combustion de matières végétales ou animales dans une centrale biomasse met en mouvement une turbine reliée à un alternateur et produit

de l'électricité. La biomasse est brûlée dans une chambre de combustion. La biomasse dégage de la chaleur qui chauffe de l'eau dans une chaudière. L'eau transformée en vapeur est envoyée sous pression vers des turbines qui alimentent un alternateur et produisent de l'électricité. Une partie de la vapeur est récupérée pour être utilisée pour le chauffage. C'est ce que l'on appelle la cogénération.

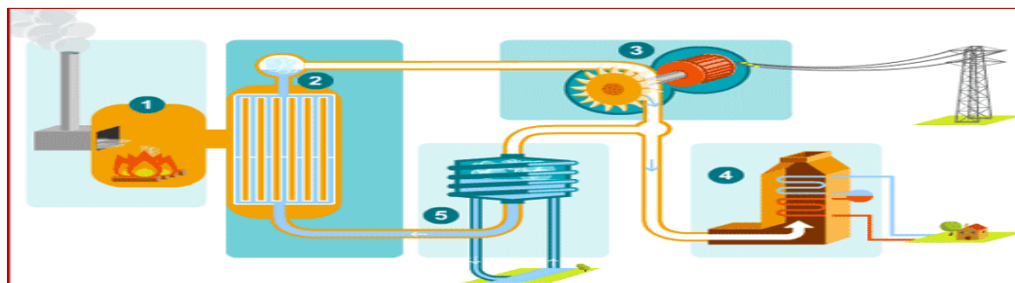


Figure IV.3.2: Production d'énergie par biocombustible.

- Pour le chauffage domestique : la biomasse (en général du bois ou des résidus végétaux) est brûlée dans des chaudières spécifiques, des poêles ou des inserts pour produire de la chaleur.
- Pour le chauffage collectif : des chaufferies de grande envergure utilisent la biomasse pour chauffer des immeubles ou groupes d'immeubles.

Pour la production d'électricité : des systèmes de cogénération et des centrales thermiques utilisent la biomasse comme combustible pour produire de l'électricité.

- La biomasse est principalement utilisée par combustion directe, mais des procédés novateurs de pyrolyse et gazéification (production d'un liquide ou d'un gaz produit à partir de la biomasse) sont en cours de développement afin d'améliorer l'efficacité énergétique et environnementale de cette ressource.
- La biomasse est l'énergie renouvelable n° 1 en Europe.
- La biomasse représente environ 50 % de la production d'énergie à partir de sources renouvelables en Europe. Le bois est le type de biomasse le plus utilisé, notamment pour le chauffage domestique (foyers ouverts, poêles, inserts, chaudières) ou les installations collectives (chaufferies au bois).
- La biomasse énergie est la matière organique (bois, paille, etc.). Elle peut être brûlée pour fournir de l'énergie et produire de la chaleur (cheminée, chaudière à bois, cuisine) ou de l'électricité. Pendant des millénaires, c'était la source principale d'énergie des hommes et elle est encore très utilisée dans le tiers-monde. Elle peut également générer du biogaz (lui-même brûlé) ou des « biocarburants » pour les véhicules.

IV.3.2.2. La biomasse comme matière première de la chimie

Elle est utilisée pour produire des tensioactifs, solvants, fluxant de bitumes, encres, peintures, résines, liants, lubrifiants, produits antigels... sans oublier les nombreux principes actifs et huiles essentielles utilisés en pharmacie et cosmétique.

Figure IV.3.3: Production d'énergie par matière première de la chimie.



IV.3.2.3. La biomasse pour les biocarburants

Biocarburant est un carburant (combustible qui alimente un moteur thermique Celui-ci transforme l'énergie chimique en énergie mécanique), produit à partir des matériaux organiques renouvelables et non fossiles. Les déchets sont d'abord transformés en un Biocarburant, par fermentation grâce à des micro-organismes (bactéries). Le Biocarburant est ensuite brûlé. Ce Biocarburant est proche du gaz naturel et majoritairement composé de méthane. Cela concerne les déchets ménagers, le fumier et lisier d'animaux, les boues de stations d'épuration, les papiers et cartons... En France, 10 % de la production d'électricité d'origine biomasse provient de la combustion du Biocarburant.

Il y a deux familles de biocarburants :

l'éthanol, produit à partir de blé et de betterave, incorporable dans le super sans plomb sous forme d'Ethyl Tertio Butyl Ether (ETBE, voir bioéthanol). l'huile végétale brute, et les esters d'huiles végétales (colza...); alternative aux carburants fossiles, les biocarburants de première génération (Éthanol et biodiesel) peuvent représenter jusqu'à 4 Mtep en 2020, soit environ 10 % d'incorporation à cet horizon. Les biocarburants de seconde génération, qui Valorisent l'ensemble de la plante, très prometteurs, seront industrialisables à moyen Terme (2015 – 2020).

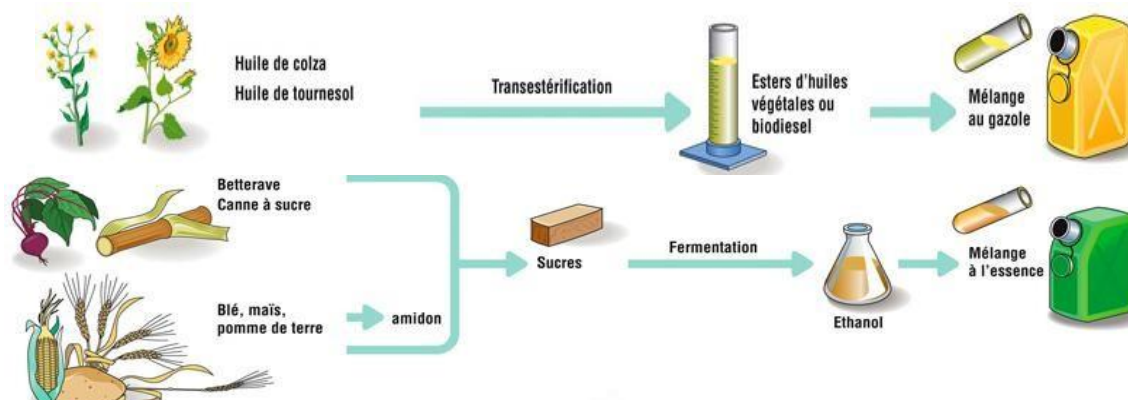


Figure IV.3.4: Production d'énergie par les biocarburants.

IV.3.3. Les avenages

La biomasse propose une alternative intéressante aux énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) à condition d'utiliser des appareils offrant un rendement élevé, évitant ainsi une pollution de l'air. La biomasse permet le chauffage, la production d'électricité, les transports (grâce aux biocarburants) et la conception de produits « bioplastique ». La valorisation énergétique du bois par exemple est intéressante :

- La biomasse peut être stockée.
- C'est une source d'énergie renouvelable à condition de bien gérer les forêts.
- Inoffensif et prévisible.
- Disponible partout est abondant.
- Participe au traitement et à l'élimination des déchets organiques, contribuant ainsi à assainir notre environnement.
- C'est une énergie dont le coût est compétitif et dont le prix varie peu.
- C'est une énergie moins polluante que les énergies fossiles. Il n'y a pas de rejets de soufre dans les fumées. Il n'y a pas d'impact sur l'effet de serre : le CO₂ rejeté dans l'atmosphère correspond en théorie à la quantité de CO₂ absorbée par les arbres pendant leur croissance.
- C'est écologique

IV.3.4. Les inconvénients

- Ces capacités sont limitées par la surface des terres disponibles.
- Leur rendement énergétique est assez faible.
- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole.
- Dégage du CO₂
- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.
- Provoque la pollution des eaux et des sols.

V.1. Introduction

L'énergie a une importance telle que nous en sommes devenus dépendants. L'économie de plusieurs pays producteurs de pétrole est basée sur les hydrocarbures, alors que ceux-ci tendent à disparaître. Il est donc devenu indispensable de trouver une source d'énergie alternative. Mais comment remplacer cette source d'énergie fossile par une nouvelle plus propre et plus efficace ? Parmi les solutions: l'énergie solaire (thermique et photovoltaïque), l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie de la biomasse, la géothermie et vu les préoccupations liées à la consommation globale d'énergie, électrique en particulier, et aux contraintes environnementales, une nouvelle méthode de conversion d'énergie s'impose: la pile à combustible. Elle apparaît comme l'un des moyens de production d'énergie pour le futur, appropriée aux énergies renouvelables, parce qu'elle ne produit pas de polluants lorsqu'elle est alimentée par de l'hydrogène pur, la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC en anglais : Proton Exchange Membrane Fuel Cell) est certainement le type de pile à combustible jouissant des efforts les plus importants de recherche et développement. La principale origine en est que les PEMFC touchent potentiellement tous les secteurs d'activité et s'ouvrent ainsi des marchés importants.

La principale caractéristique de la PEMFC est l'utilisation d'une membrane organique sélective aux protons qui joue le rôle d'électrolyte et de séparateur physique entre les deux électrodes d'une cellule élémentaire. Nous verrons plus loin que des alternatives existent. Le principal écueil à l'utilisation de cette membrane est que, comme toute membrane organique, elle résiste mal aux températures élevées et impose ainsi que la pile de type PEMFC fonctionne à de basses températures, c'est à dire inférieures à 100 °C. Ainsi, à de telles températures, l'usage de catalyseurs aux électrodes devient une nécessité pour atteindre de bons rendements lors des conversions électrochimiques. Les principaux avantages des PEMFC résident dans leur compacité et, compte tenu de la température relativement basse, d'un temps de démarrage court, par comparaison aux technologies dites à haute température (MCFC et SOFC).

V.2 Définition de PEMFC

Une pile à combustible (PAC) permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo- réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau.

V.3 Description de PEMFC

Une PAC basse température à électrolyte polymère (PEMFC) est composée au minimum de 5 éléments pour un module élémentaire (voir figure 4.1).

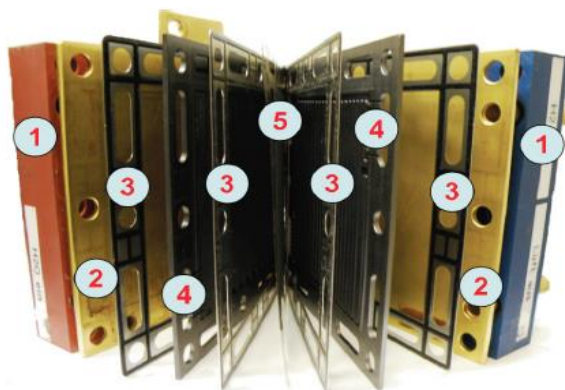


Figure V.1: Vue interne des différents composants d'une PàC de technologie PEM,(UBZM) :(1) Plaques d'extrémités ; (2) Plaques collectrices de courant ; (3) Joints d'étanchéité; (4) Plaques de distribution en gaz réactifs ; (5) Assemblage membrane électrode

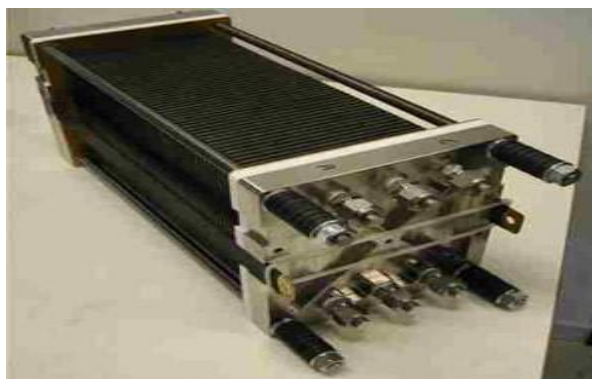


Figure V.2: Photographie d'un cœur de pile PEMFC (empilement de cellules élémentaires)

V.4 Structure interne de PEMFC

Chaque cellule de la pile est constituée de deux plaques bipolaires et d'un Assemblage Membrane Électrodes (MEA). Les deux plaques bipolaires assurent la distribution des gaz réactifs jusqu'aux les électrodes et collectent le courant électrique produit. L'assemblage électrode membrane est le cœur de la cellule, il est constitué d'une membrane polymère conductrice de protons et imperméable aux gaz et aux électrons, de deux couches actives AL où est dispersé le catalyseur, et de deux couches de diffusion de gaz GDL, comme représenté sur la Figure 4.2.

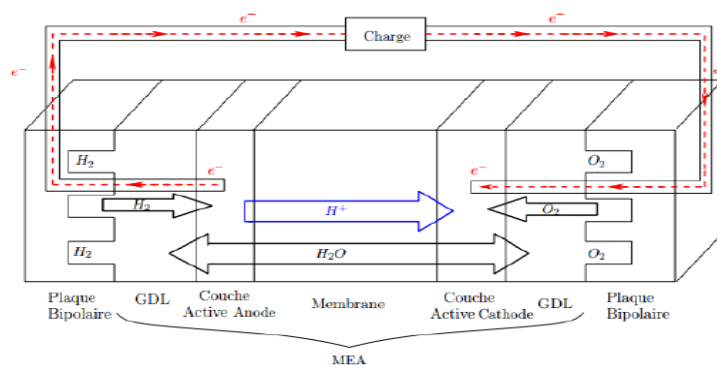


Figure V.3: Cellule d'une pile.

V.5 Les différents types de piles à combustibles

Une pile à combustible (PAC) permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau. Le coeur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons) ; une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte. L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée. L'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène (oxygène dans le langage courant) de l'air ou l'air lui même. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile. La pile à combustible (PAC) est un système de production d'énergie renouvelable qui possède de nombreux avantages. Par exemple, une pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC) ou pile à hydrogène qui utilise de l'hydrogène comme combustible, et de l'oxygène comme comburant, le déchet obtenu est de l'eau.

Les piles à combustible se différencient par sa température (basse ou haute), par sa

puissance faible ou grande et par la nature de leur électrolyte, soit acide conduisant les ions positifs (protons H^+) de l'anode à la cathode, soit basique (anions OH^- , O^{2-} , CO_3^{2-}) en sens contraire.

V.5.1 De point de vue température

- *PàC à basse température*

Pile à basse température : $< 200^\circ C$: (AFC- DBFC- PEMFC- DMFC- DEFC-PAFC - FAFC)

- *PàC à haute température*

Pile à haute température : $> 200^\circ C$: (MCFC- PCFC- SOFC).

V.5.2 De point de vue puissance

- *PàC à faible puissance* : (DBFC- DMFC).
- *PàC à grande puissance* : (AFC- PEMFC- DEFC- PAFC - FAFC- MCFCPCFC- SOFC). AFC- DBFC- PEMFC- DMFC- DEFC- PAFC - FAFC- MCFCPCFC- SOFC.

V.5.3 De point de vu application

On distingue trois grandes familles de piles :

- Les piles à combustible embarquées (voitures, bus, etc.) : véhicule léger ou un véhicule lourd ...
- Les piles à combustible stationnaires (centrales de cogénération, etc.) : Le rendement électrique d'une pile à combustible varie selon la taille de l'installation. Cette caractéristique rend possible la construction de petites unités, très proches des utilisateurs. Celles-ci ont l'avantage de pouvoir fournir en plus de l'énergie électrique, de l'eau chaude, pouvant être utilisée par exemple pour le chauffage domestique.
- Les piles à combustible miniaturisées ou "portables" (téléphones portables, ordinateurs portables, etc.) :

Les piles à combustibles se différencient par son application :

- ✓ Portable : (AFC- DBFC- PEMFC).
- ✓ Transport : (AFC- PEMFC- DMFC- FAFC).
- ✓ Stationnaire : (PEMFC- DMFC -PAFC - PCFC- SOFC).

V.5.4. De point de vue membrane:

Les piles à combustibles se différencient par la nature de leur électrolyte ou la membrane :

- Soit acide conduisant les ions positifs (protons H^+) de l'anode à la cathode : (DBFC- PEMFC- DMFC- PAFC).
- Soit basique (anions OH^- , O^{2-} , CO_3^{2-}) en sens contraire : (AFC- DBFCMCFC- SOFC).

On distingue deux grandes familles à 6 types de piles à combustible :

1. *PàC à électrolytes acides*: Trois à électrolytes acides (ions H^+ migrant de l'anode vers la cathode):

– Les PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). L'électrolyte est constitué d'une membrane solide polymère fonctionnant à basse température. ($20-100^\circ C$). Celle-ci transmet sélectivement vers la cathode les ions H^+ formés par oxydation catalytique de l'hydrogène injectée directement sur l'anode.

– Les DMFC (Direct Methanol Fuel Cell). Au lieu d'hydrogène, ces piles utilisent comme combustible le méthanol (CH_3OH). Injecté directement sur l'anode avec de l'eau son

oxydation catalytique produit des ions H^+ et du gaz carbonique. Comme sur les PEMFC, une membrane solide polymère transmet sélectivement les H^+ vers la cathode.

– Les PAFC (Phosphorique Acid Fuel Cell) utilisent à la place de membranes solides de l'acide phosphorique liquide occlus dans une matrice solide poreuse. Elles peuvent fonctionner jusqu'à 200°C.

2. PàC à électrolytes basiques: Trois à électrolytes basiques (ions négatifs migrant de la cathode vers l'anode) :

– Les AFC à potasse liquide (Alkaline Fuel Cell) utilisent l'ion OH^- libéré par réduction catalytique de cette base sur la cathode.

– Les MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) utilisent des carbonates de lithium et de potassium fondus pour faire migrer des ions CO_3^{-2} .

– Les SOFC (Solid Oxyde Fuel Cell) exploitent un électrolyte solide (zircone dopé aux terres rares) pour produire des ions O^{-2} . Figure

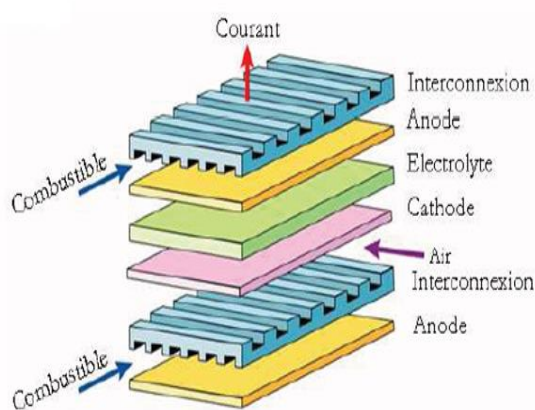
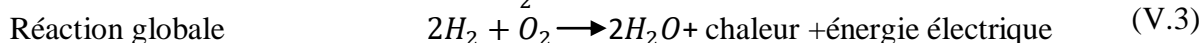
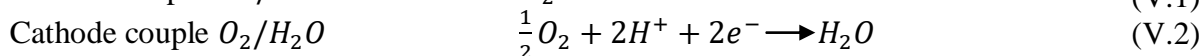
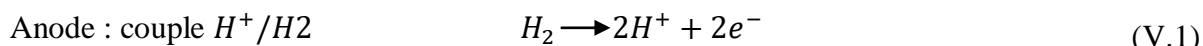


Figure V.4: Les composants d'une cellule SOFC.

V.6. Principe de fonctionnement:

Le principe de la pile à combustible a été démontré par l'Anglais William Grove, en 1839, le processus peut être décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau. En fait, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale:



Une PAC est un assemblage de cellules élémentaires, comprenant deux électrodes (l'anode et la cathode) chargées en catalyseur (le plus souvent du platine), séparées par un électrolyte, dont le rôle est de permettre la migration des ions d'une électrode à l'autre, sous l'effet du champ électrique créé. (cette réaction crée une différence de potentiel entre les électrodes de l'ordre du Volt, Du fait de ce caractère naturel très basse tension, les constructeurs assemblent plusieurs cellules électrochimiques en série afin d'obtenir une tension suffisamment élevée pour l'exploiter, d'un point de vue électrique, avec un rendement satisfaisant)

- L'anode: (où se passe l'oxydation) est alimentée en combustible (H_2 , CH_3OH ,...), selon la réaction d'oxydation (V.1).

- La cathode: (où se passe la réduction) est alimentée en comburant (O_2 , air,...), selon la réaction de réduction (V.2).

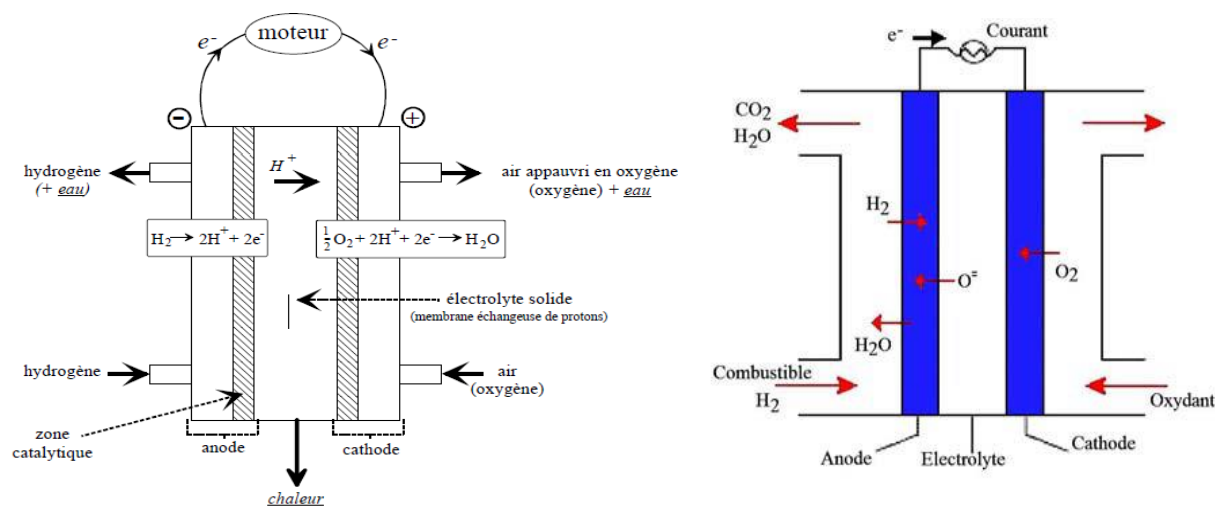


Figure V.5: Schéma principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC.

L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des protons (H^+). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur s'il n'est pas éliminé pendant le procédé de purification, d'où une diminution de l'efficacité de la pile à combustible.

De nombreux Laboratoires sont à la recherche de catalyseurs plus robustes et moins chers, et d'électrolytes polymériques échangeurs d'ions plus efficaces et également moins coûteux. Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir de feuilles de graphite, de composites ou de métaux à base de carbone.

Tableau 1: Différentes technologies des piles à combustible

Description	PEMFC	SOFC	MCFC	AFC	PAFC	DMFC
Gaz à l'anode	Hydrogène	H ₂ , CH ₄ , Gaz de synthèse	H ₂ , CH ₄ , Gaz de synthèse	Hydrogène	Hydrogène	Méthanol
Gaz à la cathode	Oxygène	Oxygène	Oxygène	Oxygène	Oxygène	Oxygène
Electrolyte	Membrane polymère	Céramique	Carbonate de métaux alcalins	Hydroxyde de potassium	Acide phosphorique	Membrane polymère
Température de fonctionnement	70–200°C	800–1050°C	environ 650°C	60–90°C	environ 200°C	90–120°C
Puissance	1W à 10 MW Stack: Stack:	Jusqu'à 100 MW Stack: Stack:	Jusqu'à 100 MW Stack: Stack:	10 à 100 kW Stack: Stack:	Jusqu'à 10 MW Stack: Stack:	Jusqu'à 100 kW Stack: Stack:
Rendement électrique	50–70% Système: 30%	60–65% Système: 55%	55% Système: 40%	60–70% Système: 62 %	55% Système: 40%	20% Système: 30%
Champs application	Portable, transport, stationnaire	Stationnaire	Stationnaire	Portable, transport	Transport, Stationnaire	Transport, stationnaire

V.7 La force électromotrice (f.e.m.)

Une cellule électrochimique de pile à combustible réalise la transformation d'une énergie chimique en une énergie électrique. Dans le cas théorique d'une réaction réversible, la relation entre ces deux formes d'énergie s'écrit :

$$E_{th} = -\frac{\Delta G}{nF} \quad (V.4)$$

Où :

- E_{th} est la force électromotrice théorique d'une cellule à l'équilibre (circuit ouvert)
- F est la constante de Faraday
- n est le nombre d'électrons échangés dans la réaction électrochimique élémentaire, (ici $n = 2$)
- ΔG est l'énergie chimique transformée en énergie électrique, appelée « variation d'enthalpie libre » ou encore « variation d'énergie libre de Gibbs ».

Influence des conditions expérimentales de la réaction : La variation d'enthalpie libre ΔG dépend des conditions de la réaction, et plus précisément des activités des espèces :

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln(\Pi(a_i)^{v_i}) \quad (V.5)$$

ΔG : Variation d'enthalpie libre standard de la réaction à la température T , i.e. définie par rapport à la pression de référence de 1 bar. Par définition, l'état physique d'un corps pur sous la pression $P_0 = 1$, à la température T , est appelé état standard du corps pur à cette température. $RT \ln(\Pi(a_i)^{v_i})$: Influence de l'activité des produits et des réactifs notés a_i , suivant les coefficients stoechiométriques v_i . Dans le cas de la réaction d'oxydoréduction entre H_2 et O_2 :

- l'activité du produit est celle de l'eau liquide égale à 1.
- l'activité des réactifs est celle de H_2 et O_2 ; les coefficients stoechiométriques sont respectivement 1 et 1/2 pour H_2 et O_2 .

Remarque : la notion d'activité exprime l'écart entre le comportement d'un constituant dans une solution non idéale et celui de ce constituant dans une solution idéale. On utilise :

- pour les espèces en solution la concentration $a = [C]$.
- pour les gaz les pressions partielles $a = P$.
- pour les solides l'activité est égale à 1.

La pression partielle est le produit de la pression totale du mélange de gaz par la fraction molaire du gaz considéré.

En fait, ce terme prend en compte l'écart entre la pression réelle et la pression standard de 1 bar. On obtient alors :

$$R \cdot T \ln(\Pi(a_i)^{v_i}) = R \cdot T \ln((P_{H_2}(P_{O_2})^{\frac{1}{2}})) \quad (V.6)$$

La forme générale de l'équation de Nernst est comme suit

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{\Pi(\text{activité des réactifs})}{\Pi(\text{activité des produits})}\right) \quad (V.7)$$

Grandeurs standards : Le terme ΔG° permet de définir un potentiel standard à l'équilibre thermodynamique, qui est le potentiel maximal théoriquement atteignable E° dans les conditions standards de pression. Cette différence de potentiel standard, est propre au couple rédox O_2/H_2 . A $25^\circ C (298K)$ et $P = 1 \text{ bar}$, $\Delta G^\circ = -237.2 \text{ KJ/mol}$ pour de l'eau produite à l'état liquide. On peut de même définir un potentiel standard : $E^\circ = \Delta G^\circ / nF$. Le potentiel vaut

alors $E^0 = 1.23V$. La valeur de E^0 est une valeur théorique qui n'est jamais atteinte en pratique.

V.8 Potentiel thermodynamique réel de PAC

Le potentiel thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC H_2/O_2 à $25^\circ C$ et à 1 atm est de l'ordre de 1,23 V, mais le potentiel réel (V) de la cellule décroît par rapport au potentiel thermodynamique d'équilibre quand le courant débite.

D'après la loi de Nernst, cette différence de potentiel, qu'on appelle E_{th} , dépend à la fois des pressions partielles des réactifs et de la température. La tension E_{th} , est le potentiel thermodynamique réversible de la réaction. Mais il existe des irréversibilités qui induisent une chute de tension aux bornes d'une cellule.

La tension utilisable lorsque la pile est parcourue par un courant raisonnable, s'éloigne de l'équilibre à cause des pertes irréversibles montrées à la figure??. De nombreuses sources contribuent à des pertes irréversibles dans une pile à combustible.

$$V = E_{th} - pertes \quad (V.8)$$

Les pertes, appelées souvent polarisation, proviennent principalement de trois sources : la polarisation d'activation, la polarisation ohmique, et de la polarisation de concentration. Cette caractéristique peut être décomposée en trois phénomènes prépondérants en fonction de la valeur de la densité de courant.

- La première zone représente la surtension d'activation anode et cathode qui est le phénomène le plus important pour les faibles densités de courant.
- La deuxième zone caractérise le comportement ohmique de la cellule, c'est la zone la plus utilisée en fonctionnement car elle est linéaire et elle est valable sur une forte plage de variation de la densité de courant.
- La troisième zone liée à la limitation par diffusion et nuage.

Comme on peut le constater sur la figure 4.7, à faible densité de courant, la polarisation d'activation est dominante. Les pertes ohmiques, qui sont directement proportionnelles à la densité de courant, deviennent ensuite prépondérantes sur une large gamme de densité de courant. Et enfin, à hautes densités de courant, les pertes dues au transport du gaz deviennent dominantes.

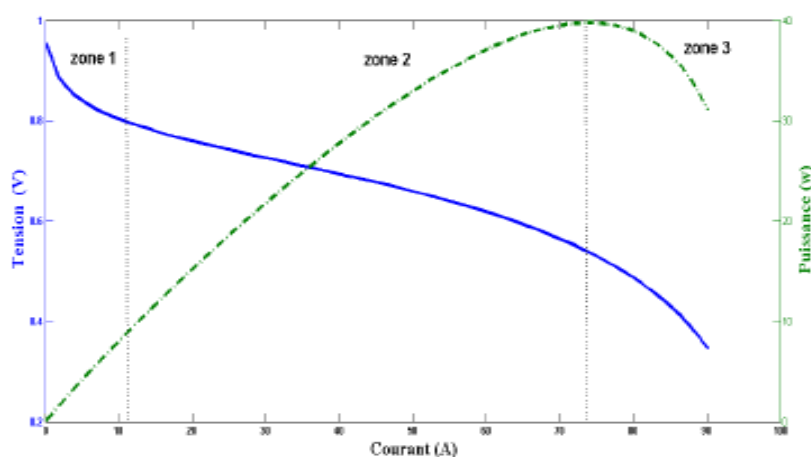


Figure V.6: Caractéristique tension et puissance de la pile en fonction de la densité de courant.

V.9 Modélisation de pile à combustible(PEMFC)

V.9.1 Modèle statique de PAC Dans cette section, on représente le modèle de la pile à combustible sous forme statique. La tension EPAC est calculée en fonction du courant de la

pile IPAC, la pression de la cathode P_{ca} , les pressions partielles des gaz réactifs PO_2 et PH_2 , la température de la pile, et le degré d'humidité de la membrane en se basant sur une combinaison des relations physiques et empiriques.

La tension en boucle ouverte de la pile à combustible est calculée à partir du bilan énergétique entre l'énergie chimique des gaz réactifs et l'énergie électrique. En mode de fonctionnement, trois types de pertes principales influencent la tension de sortie de la pile. La tension d'une cellule élémentaire de la pile à combustible est alors :

$$V = E_{th} - \eta_{act} - \eta_{ohmc} - \eta_{diff} \quad (V.9)$$

E_{th} Est la tension théorique en boucle ouverte,

η_{act} Représente les pertes d'activation,

η_{ohmc} Les pertes ohmiques,

η_{diff} Les pertes de concentration.

La PàC comporte plusieurs cellules élémentaires placées en série, alors la tension aux bornes de la pile est la somme des tensions de ces cellules individuelles. En supposant que les cellules sont identiques, la tension de la pile peut être calculée en multipliant la tension d'une cellule par le nombre total N de cellules composant la pile :

$$V_{st} = N \cdot V \quad V_{st} = N \cdot V \quad (V.10)$$

V.9.1.1 Tension en boucle ouverte

En utilisant les valeurs thermodynamiques du changement d'entropie à l'état standard, la tension est donnée en ; avec la température T exprimée en Kelvin, et, les pressions partielles PH_2 et PO_2 . La tension réelle aux bornes d'une cellule est inférieure à la tension en boucle ouverte à cause des différents types de pertes.

Le potentiel thermodynamique est défini par une équation de Nernst sous forme développée comme :

$$E_{th} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3085 \cdot 10^{-5} * (\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{O_2})) \quad (V.11)$$

Où : T désigne la température de la cellule et est égale à 328K.

P_{H_2} P_{O_2} ont les pressions d'hydrogène et d'oxygène partielles (atm).

V.9.1.2 Pertes d'activation (Charge transfert cinétique)

Les pertes d'activation sont dues à la vitesse des réactions chimiques au niveau de la surface de réaction. Une partie de l'énergie est utilisée pour activer et accélérer les réactions chimiques, ce qui est à la base de cette chute de tension qui est fortement non linéaire. En d'autres termes, la polarisation d'activation est présente quand le taux d'une réaction électrochimique à la surface de l'électrode est contrôlé par le ralentissement de la cinétique pour cette électrode. Il existe aussi une autre raison de chute de tension qui est due aux courants de fuite. La relation entre les pertes d'activation V_{act} et la densité de courant est décrite par l'équation de Tafel :

$$V_{act} = a \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (V.12)$$

Où « a » est une constante et i_0 est la densité de courant d'échange qui est aussi constante. La densité de courant est définie par :

$$i = \frac{I_{PAC}}{A} \quad (V.13)$$

Où I_{PAC} (A) est le courant de la pile, qui est le même au niveau de toutes les cellules étant en série, et A (cm²) est la surface active d'une cellule. Puisque l'équation de Tafel est valable uniquement pour $i > i_0$, une autre fonction similaire qui est valable dans tout le domaine de i est utilisée :

$$V_{act} = V_0 + V_a(1 - e^{-C_1 i}) \quad (V.14)$$

où V_0 est la chute de tension à une densité de courant nulle, et V_a (V) et C_1 sont des constantes. Ce type de pertes dépend fortement de la température et de la pression partielle d'oxygène. L'expression simple proposée par J.C. Amphlett et al. pour toute la surtension d'activation est exprimée dans l'équation 5.7.

$$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln((C_{O_2}^*)) + \xi_4 T \ln(I) \quad (V.15)$$

I est le courant de fonctionnement de la pile (A) et $\xi_1; \xi_2; \xi_3; \xi_4$ des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de PàC dont un modèle bien développée dans le papier, identifie les paramètres exactes utilisés dans cette thèse, qui sont donnés par l'expression suivante :

V.9.1.3 Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant l'électrolyte et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes et le circuit électrique. Les pertes ohmiques sont principalement dues à l'électrolyte et peuvent être réduites en diminuant l'épaisseur de l'électrolyte et en améliorant sa conductivité ionique. L'électrolyte et les électrodes obéissent à la loi d'Ohm, il s'agit, dans la membrane électrolyte polymère, d'une conduction ionique. Ou, les ions ayant une mobilité bien plus faible que les électrons, la résistance de la membrane est bien plus grande. On peut exprimer les pertes ohmiques par l'équation suivante :

$$V_{ohm} = I. (R_M - R_C) \quad (V.16)$$

R_C est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons, R_M est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons.

V.9.1.4 Pertes de concentration (Mass Transport)

Lorsque, à une électrode, il y a une perte de potentiel dû à l'incapacité du système à maintenir la concentration initiale des réactants, on a alors la formation d'un gradient de concentration. De nombreux facteurs peuvent contribuer à la polarisation de concentration : la faible diffusion du gaz à travers les électrodes poreuses, la dissolution des réactants ou des produits dans l'électrolyte, la diffusion des réactifs ou des produits du site de la réaction vers l'électrolyte ou l'inverse. Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V_{con} = -B. \left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \quad (V.17)$$

où B est une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement, J est la densité de courant du fonctionnement permanente A/cm², J_{max} est la densité de courant maximale.

V.9.2 Modèle dynamique de PAC (Modèle d'impédance)

Le modèle que l'on peut définir part de l'architecture de la cellule élémentaire d'une pile PEM, d'où l'on déduit un modèle électrique caractérisant les différentes zones de celle-ci. L'axe des x correspond à l'axe de déplacement des espèces et c'est selon cet axe que sont

définies les différentes impédances : résistance des contacts, capacité de double couche des électrodes en parallèle sur l'impédance caractéristique des phénomènes électrochimiques (activation et transport) et résistance de la membrane.

Hypothèses :

Ce modèle est symétrique de part et d'autre de la membrane et est souvent simplifié suivant celui de la figure suivante où l'on regroupe l'ensemble des résistances de contacts et de la membrane et des termes correspondant aux phénomènes situés aux électrodes. Cette simplification repose sur une hypothèse qui considère que la réaction anodique est beaucoup

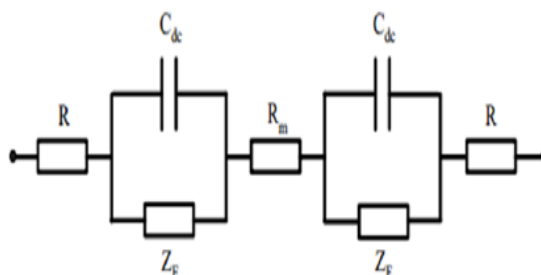


Figure V.7: Schéma électrique équivalent d'une cellule élémentaire.

plus rapide que la réaction cathodique dans le cas d'une pile alimentée avec de l'hydrogène pur et de l'oxygène extrait de l'air. Cette réaction est ralentie par la faible concentration de l'oxygène dans l'air. Les phénomènes de transfert au niveau de l'anode peuvent donc être négligés. Alors, la représentation de la pile peut être limitée au schéma suivant :

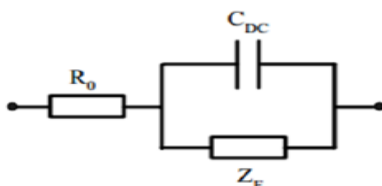


Figure V.8: Schéma électrique simplifié d'une cellule élémentaire

La représentation la plus simple d'une cellule de pile à combustible sous la forme d'un schéma électrique est donnée ci-dessous. Dans ce cas, les phénomènes de diffusion sont négligés. Le tracé de cette impédance dans le plan de Nyquist correspond à un demi cercle de centre $(R_M + R_T/2, 0)$ et de rayon $R_T/2$. A basse fréquence,

$$Z(w) = R_M + \frac{R_T}{1 + j.w.R_T.C_{DC}} \tag{V.18}$$

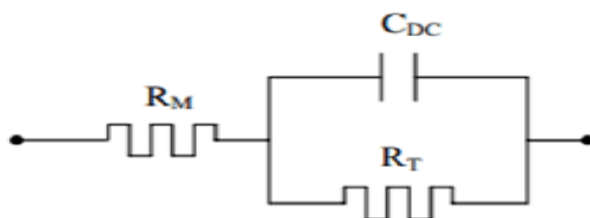


Figure V.9: Impédance du modèle simple dans le plan de Nyquist.

- [1] M. Belatel, F.Z. Aissous, F. Ferhat « Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte », Revue des énergies renouvelables, Vol 15 n°1, p 13-28, 2012.
- [2] Thierry Alleau « Le stockage de l'énergie : la solution hydrogène et les piles à combustible », école d'été de physique, CAEN, 2001.
- [3] Anne LABOURET et Michel VILLOZ, "Energie solaire photovoltaïque", (le manuel du professionnel). Edition : DUNOD. Paris. 2003.
- [4] M. HATTI, IEEE Member, "Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque", Centre de Recherche Nucléaire de Birine, B.P 180 Ain Oussera 17200, Djelfa Algérie. JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre 2008.
- [5] A. MEDJBER « Modélisation et optimisation d'un système hybride PV/éolien à l'aide des techniques de l'intelligence artificielle », Tese de doctorat, Blida, mai 2017.
- [6] A. MEDJBER "Comparative Study between Direct and Indirect Vector Control Applied to a wind Turbine Equipped with a Double-fed Asynchronous Machine", International journal of renewable energy research, al., Vol.3, No.1, 2013
- [7] M. Mohammedi, « Stockage de l'Énergie », Support de Cours, université mohamed khider, Biskra.
- [8] C. Darras « Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque/hydrogène : applications site isolé, micro-réseau et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H) ». HAL, Université Di corsica, école doctoral et environnement et société UMR cnrs 6134 PSE, Submitted on 6 May 2011.
- [9] J, François Fauvarque « Batteries...Tout l'art de stocker l'énergie », Laboratoire d'Electrochimie Industrielle CNAM Paris.
- [10] Sabonnadière Jean Claude. Nouvelles technologies de l'énergie 1: Les énergies renouvelables, Ed. Hermès.
- [11]. Gide Paul. Le grand livre de l'éolien, Ed. Moniteur.
- [12] A. Labouret. Énergie Solaire photo voltaïque, Ed. Dunod.
- [13] Viollet Pierre Louis. Histoire de l'énergie hydraulique, Ed. Press ENP Chaussée.
- [14] Peser Felix A. Installations solaires thermiques: conception et mise en œuvre, Ed. Moniteur.
- [15] <http://www.energie renouvelable.org>