

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

**Université Mustapha Stambouli De Mascara**  
**Faculté Des Sciences Et Technologie**

**Polycopié de Cours**

# **Les Energies renouvelables**

**Chergui Moulay-Idriss**

Ce cours est destiné aux étudiants de Parcours/spécialité  
d'Electrotechnique en première année Master Réseaux électriques

Algérie  
2021

## *Avant-Propos*

De nombreuses énergies non polluantes et renouvelables abondantes partout à la surface de la terre pourraient pourtant être utilisées par l'homme, parmi elle on distingue l'énergie éolienne, l'énergie Hydroélectrique et l'énergie solaire qui est la plus intéressante car, l'énergie solaire est disponible partout à la surface du globe, en quantité égale dans l'année, et elle est de plus facile à exploiter. Elle semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir. Parmi ces application, la plus intéressante est l'énergie solaire photovoltaïque en effet cette dernière peut être utilisé pour alimenter tous types de équipements électriques dans les sites isolés, ou pour extraire de l'eau pour la consommation et l'irrigation en agriculture.

« **Energies renouvelables** » est une matière essentielle. Le contenu de ce polycopié est débuté par une étude étymologie et utilisation du mot 'Energie' l'intérêt et l'utilité de cette matière, spécifiquement les ressources des énergies renouvelables solaires et éoliennes, est pour doter aux étudiants des bases scientifiques leur permettant d'intégrer la communauté de la recherche scientifique dans le domaine des énergies renouvelables, des batteries et des capteurs associés à des applications d'ingénierie.

Ce polycopié est destiné aux étudiants de la première année master de la spécialité réseaux électriques en Electrotechnique du régime LMD, ainsi que les étudiants de la deuxième année master de la spécialité réseaux électriques en Electrotechnique. Nous enseignons ce contenu de ce polycopié dans le département de l'électrotechnique de la faculté des sciences et de la technologie à l'université de Mascara. Il est présenté avec un style simple qui permet aux étudiants une compréhension graduelle et très rapide.

Mascara, le 28 Fevrier 2021

## Table des matières

Avant Propos.....	ii
Résumé.....	5
Notations et Abréviations.....	iv
Introduction générale.....	i
Chapitre-I Généralité sur les Ressources d'énergies renouvelables.....	8
I.1 Étymologie, définitions et utilisation du mot "Energie" .....	8
I.2. Formes d'énergies libres.....	8
I.3 Classification.....	10
I.3.1 Énergies primaires et secondaires.....	11
A. Les sources d'énergie primaire.....	11
B. Les sources d'énergie secondaire.....	11
I.3.3 Les Sources d'Énergies Renevelables.....	13
I.3.4 Les Sources d'Énergies non renouvelables.....	14
I.3.5 Le Nucléaire : cas particulier.....	15
I.3.7 Unités de mesure et chiffres clés.....	15
I.3.8 Futur.....	16
Chapitre-II Énergie solaire.....	31
II. Introduction.....	31
II.1 Énergie solaire photovoltaïque.....	32
II.1.6 Technologies des cellules photovoltaïques.....	41
II.1.8 Fonctionnement d'un GPV à sa puissance maximale.....	43
II.1.9 Protections classiques d'un générateur PV.....	45
II.1.10 Connexion directe entre le GPV et la charge.....	46
II.1.11 Introduction d'un étage d'adaptation.....	47
II.2 Énergie Solaire Thermique.....	52
II.3 Évaluation .....	52
Chapitre-III ÉNERGIE EOLIENNE .....	43
III Introduction.....	43
III.1 Les trois manières d'utilisation de la source d'énergie éolienne.....	44
III.2 Variabilité de la production éolienne.....	44
III.3 Composition d'une éolienne .....	45
A. Ailes ou pales d'une éolienne.....	45
B. La tour ou le mât d'une éolienne.....	45
C. La partie électrique d'une éolienne.....	45
III-4 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	47
III-5 Connaître la puissance d'une éolienne.....	48
Chapitre-IV Autres sources renouvelables : Hydraulique, Géothermique, Biomasse.....	48
IV-Ressources d'énergie hydroélectrique .....	48
IV-1 La Géothermie.....	50
IV-2 La Biomasse.....	53
IV-4 énergie de la mer.....	54
chapitre-V Stockage: Accumulateur, Pile à combustibles et Hydrogène .....	55
Conclusion.....	57
References.....	58



## **Résumé**

De nos jours, l'homme dispos de nombreuses sources d'énergie, les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, Pétrole, gaz) ...etc. Les réserves d'énergie fossiles commencent à diminuer et lors de leur utilisation engendre une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de Carbone) qui participent fortement au réchauffement planétaire.

En ce qui nous concerne dans ce polycopié, il s'agirait d'étudier et d'évaluer quelques énergies renouvelables et non renouvelables, primaires et secondaires.

## **Mots-clés :**

Energies renouvelables, Energie solaire photovoltaïque Energie solaire thermique), Cellules solaires, rayon solaire, ensoleillement, Capteurs, Energie éolienne, Stockage.

## Notations et Abréviations

### CHAPITRE-I

Symbole	Signification
<b>GPV</b>	Générateur photovoltaïque
<b>MPP</b>	Maximum Power Point
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>MTEP</b>	Million de Tonne d'Equivalent Pétrole
<b>OMS</b>	Organisation Mondiale de la Santé
<b>Projets EnR</b>	Projets des énergies renouvelables
<b>PV</b>	Photovoltaïque

### CHAPITRE-II

Symbole	Signification	Unité
$A_i$	Rapports cycliques des vecteurs $V_i$	
<b>AM</b>	masse d'air (Air Mass, en Anglais)	
$A_{eff}$	Surface Effective du module photovoltaïque	m <sup>2</sup>
$A_T$	Surface Totale du module photovoltaïque	m <sup>2</sup>
$c$	Vitesse de la lumière	m/s
$E_{ph}$	Energie de photon	J
$E_g$	Larguer de la bande interdite du matériau	eV
$f$	Fréquence électrique	Hz
<b>G</b>	Niveau d'Eclairement (d'irradiation ou d'enseillement)	W/m
$h$	Constante de Plank	J.s
$I(k)$	L'intensité en sortie du panneau à l'itération $K$	A
$I_{CC}$	Courant de Court-Circuit	A
$I_{CELL}$	Courant fourni par la cellule	A
<b>Inc-Cond</b>	Incremental Conductance	
$I_{OPT}$	Courant Optimal d'un générateur ou d'une cellule pho-	A
$I_{maxPV}$	Courant maximum d'un générateur ou d'une cellule PV	A
$I_{GPV}$	Courant délivré par le générateur photovoltaïque	A
$I_D$	Courant de la diode	A
$I_{SAT}$	Courant de Saturation d'une diode	A
$k_B$	Constante de Boltzmann [ $1.38 \cdot 10^{-23}$ ]	JK <sup>-1</sup>
$k_V$	Facteur de tension, dépend du GPV et de la tempéra-	
$K_I$	Facteur de courant, dépend du GPV et de la tempéra-	
<b>PN</b>	Jonction d'un dispositif semi-conducteur constitué d'un	
$P(k)$	La puissance en sortie du panneau à l'itération $K$	W
<b>P&amp;O Per-</b>	Pertube & Observe	
$P_{in}$	Puissance à l'entrée de l'étage de conversion	W

$P_{MAX}$	Puissance Maximale du générateur photovoltaïque	W
$P_{nom}$	Puissance nominale de l'étage d'adaptation	W
$P_{out}$	Puissance à la sortie de l'étage de conversion	W
$P_{PV}$	Puissance délivrée par le GPV	W
$R$	coefficient de réglage en tension	W
$R_p/R_{S(pv)}$	Résistance shunt/ Série du photovoltaïque	
$S$	Grandeurs booléennes de commande	
$T$	Température effective des cellules	K°
$T_{amb}$	Température ambiante	C°
$T_i$	Temps de commutation pour les tensions de vecteurs $V_i$	S
$V_{CELL}$	Tension fourni par la cellule	V
$V_{OC}$	Tension de Circuit Ouvert	V
$V_{OPT}$	Tension Optimale d'un générateur ou d'une cellule	V
$V_{PV}$	Tension aux bornes du générateur photovoltaïque	V
$V(K)$	La tension en sortie du panneau à l'itération $K$	V
$V_S$	Vecteur tension délivrée par l'onduleur à deux niveaux	V
$\eta_{Chaîne}$	Rendement de la Chaîne de conversion	%
$\eta_{CONV}$	Rendement de conversion de l'étage d'adaptation	%
$\eta_{MPPT}$	Rendement de la Commande MPPT	%
$\eta_{GPV}$	Rendement du générateur photovoltaïque	%
$\eta_{TOTAL}$	Rendement Global de la Chaîne de conversion	%
$\lambda$	Longueur d'onde	M
$\nu$	Fréquence	Hz
$\tau$	Durée de vie des porteurs minoritaires.	S
$L$	Longueur de diffusion	M

## ***Introduction Générale***

De nos jours, l'homme dispose de nombreuses sources d'énergie, les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, Pétrole, gaz) ...etc. Les réserves d'énergie fossiles commencent à diminuer et lors de leur utilisation engendrent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de Carbone) qui participent fortement au réchauffement planétaire.

La production d'électricité est responsable de 35% des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'activité humaine dans le monde. Fort heureusement, les énergies renouvelables, ou énergies vertes, ont connu un véritable essor depuis les années 2000. Ces nouvelles filières de production d'énergie devraient à l'avenir représenter une plus grande partie de notre mix électrique.

essentielle aux combustibles fossiles. Leur utilisation permet non seulement de réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant de la production et de la consommation d'énergie, mais aussi de réduire notre dépendance énergétique face aux importations de combustibles fossiles (essentiellement gaz et pétrole).

Les ressources renouvelables sont variées et inépuisables. Leur conversion en énergie thermique, chimique ou électrique présente peu de dangers humains et écologiques. De plus, la production peut être centralisée ou décentralisée. En revanche, elle se caractérise par un rendement relativement faible, un coût important et une intermittence de la ressource. Des systèmes utilisant l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ainsi que la biomasse fonctionnent dans de nombreuses régions du monde. Ils deviennent de plus en plus efficaces et rentables. L'énergie alternative qui peut accomplir la demande mondiale jusqu'à maintenant c'est l'énergie solaire.

Le monde est fortement convaincu par le fait que l'unique énergie alternative à l'énergie naturelle conventionnelle est l'énergie renouvelable, en particulier l'énergie solaire

En ce qui nous concerne dans ce polycopié, il s'agirait d'étudier et d'évaluer quelques énergies renouvelables et non renouvelables, primaires et secondaires. Il contient les chapitres et les axes du module « Les ressources des '**Energies renouvelables**' » selon le programme défini par arrêté ministériel du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Le polycopié est divisé en quatre chapitres:

### ***Chapitre I:***

- Étymologie, Concepts et définitions des mots utilisés dans ce module,
- Introduction aux ressources des énergies renouvelables, gisements et matériaux.

### ***Chapitre II :***

- Énergie solaire (photovoltaïque et thermique....)

### ***Chapitre III :***



- Energie éolienne

***Chapitre IV :***

- Autres sources renouvelables : hydraulique, géothermique, biomasse

***Chapitre V :***

- Stockage, Pile à combustibles et Hydrogène

# Chapitre-I Généralité sur les Ressources d'Energies Renouvelables

## *II Étymologie, définitions et utilisation du mot "Energie"*

Le terme "énergie" recouvre des réalités nombreuses et diverses. Si l'on met à part ses utilisations imagées comme "un homme plein d'énergie", l'énergie désigne une capacité à agir quels qu'en soient les modes : mettre en mouvement, échauffement, transmettre une information, etc...[1, 2]

Dans le langage courant, le terme "énergie" est employé en substitution d'énergie utilisable par l'homme, aussi appelée "énergie libre". Ainsi quand il est fait référence à la consommation d'énergie, il faut comprendre consommation d'énergie utilisable par l'homme ou encore consommation d'énergie libre. Cette précision est d'autant plus importante que le monde scientifique a démontré que dans un système isolé, l'énergie totale est toujours conservée (premier principe de la thermodynamique), ce qui exclut toute consommation ou déperdition d'énergie. A contrario, l'énergie utilisable par l'homme, qui constitue une sous-partie de l'énergie totale, peut effectivement être consommée.

L'histoire de l'homme a été substantiellement marquée par l'évolution des sources d'énergie libre qu'il a su ou pu utiliser. Au début, la seule énergie libre à la disposition de l'homme était sa propre énergie. En maîtrisant le feu pour chauffer, cuire, éclairer ou travailler les métaux, il a franchi la première marche de son apprentissage énergétique. Sont venues ensuite l'utilisation de l'énergie animale domestiquée, éolienne, hydraulique, thermique à cycles, chimique, électrique, nucléaire, solaire, etc. Chacune de ces étapes a été l'occasion d'une évolution le plus souvent majeure des structures des sociétés humaines.[1,2].

### *1.2 Formes d'énergies libres*

Aujourd'hui l'énergie utilisable par l'homme se présente en de multiples formes. Malgré cette diversité, les scientifiques ont réussi à établir des équivalences de telle sorte à pouvoir utiliser les mêmes unités de mesure pour chacune d'elles. Sous certaines conditions Les énergies peuvent être

transposées en d'autres. Par exemple, l'énergie nucléaire peut être transformée en énergie électrique. Dans ces transformations, il y a globalement une dégradation de l'énergie passant d'un stade plus ou moins noble et structuré (énergie chimique, énergie de radiation, etc.) vers un stade final de chaleur, c'est-à-dire de mise en mouvement désordonné de molécules. Ces transformations partiellement irréversibles obéissent entre autres au deuxième principe de la thermodynamique.

#### *A. L'énergie de gravitation*

Elle naît de l'attraction directe et réciproque entre deux corps massifs. Elle est négligeable pour de petits objets entre eux, mais devient majeure à une plus grande échelle. C'est elle qui met en mouvement vers le sol un objet rendu libre ou qui génère le mouvement des planètes autour du soleil. Elle est utilisée par exemple dans des barrages hydrauliques où, en faisant s'écouler de l'eau dans des canalisations, elle permet de mettre en mouvement des turbines.

#### *B. L'énergie cinétique dont l'énergie éolienne*

Elle naît du mouvement d'un corps massif. C'est elle qui caractérise l'énergie d'une voiture lancée sur la route ou celle du vent. Elle est omniprésente dans ses effets microscopiques car ce sont les énergies cinétiques des molécules et atomes d'un corps qui déterminent son niveau de température. La température est ainsi une mesure indirecte du degré d'agitation des particules. L'énergie cinétique permet de mettre en mouvement les pales des éoliennes qui elles-mêmes actionnent des générateurs d'électricité.

#### *C. L'énergie thermique ou calorique*

Elle naît de la température d'un corps qui selon les cas peut diffuser de la chaleur pour des cuissons, pour accélérer des réactions chimiques mais aussi pour générer des mouvements. Cette génération de mouvement n'est possible que si la température d'un corps peut être confrontée à la température d'un corps plus froid. Cette loi physique a été précisée dans le deuxième principe de la thermodynamique. L'énergie thermique a eu un rôle essentiel dans la révolution industrielle permettant notamment la pro-

duction d'acier et la mise en mouvement des locomotives à vapeur. Elle actionne aujourd'hui les turbines et alternateurs générant de l'électricité. La géothermie, chaleur provenant du globe terrestre, est un cas particulier de l'énergie thermique.

#### *D. L'énergie radiative dont l'énergie solaire*

Elle naît des rayonnements reçus. Ceux-ci sont, suivant leur longueur d'onde, de natures différentes (ondes radio, lumière visible, rayons Ultra-Violets, rayons X, etc.) mais ont en commun de pouvoir se déplacer même dans le vide et ceci à la vitesse de la lumière. C'est l'énergie radiative qui permet à une ampoule électrique d'éclairer, à un four à micro-ondes de cuire les aliments, à un radar de mesurer une vitesse. Le Soleil est une source importante de radiation reçue sur Terre. Il nous envoie un niveau important d'énergie par petits paquets dits photons, présentant des longueurs d'ondes différentes. C'est cette énergie qui est récupérée directement en électricité dans les centrales photovoltaïques, ou encore en chaleur ultérieurement transformée en électricité dans les centrales thermodynamiques.

#### *E. L'énergie chimique dont les énergies fossiles*

Elle naît des forces de liaison regroupant des atomes dans une molécule. Dans des réactions chimiques où se reconstituent de nouvelles molécules fréquemment plus stables chimiquement que les molécules initiales, se dégage une quantité de chaleur. C'est elle qui est utilisée dans un accumulateur ou une pile électrique en libérant de l'énergie récupérée en mouvement d'électrons, c'est-à-dire en électricité. C'est elle qui est libérée dans la combustion d'une bûche par exemple dans un foyer. Les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon...) sont une forme particulière d'énergie chimique. L'énergie issue de la biomasse est également d'origine chimique.

#### *F. L'énergie électrique*

Elle naît du déplacement des électrons dans un conducteur. Sa production est issue de la consommation d'autres formes d'énergie. C'est elle qui actionne les moteurs électriques, fait fonctionner les circuits

électroniques intégrés et les différents types d'éclairage. Elle se caractérise par une grande facilité de distribution mais présente une difficulté de stockage. Son domaine d'application ne cesse de croître.

### *G. L'énergie nucléaire*

Elle naît de l'utilisation des forces de liaison des protons et des neutrons au sein du noyau des atomes. En transformant par fission des atomes lourds tels que l'uranium 235 ou par fusion des atomes légers tels que les isotopes d'hydrogène, une réaction nucléaire libère de la chaleur, des neutrons, des rayons alpha, beta, gamma... La chaleur de fission est utilisée dans les centrales nucléaires pour actionner les générateurs d'électricité au travers de fluides caloporteurs. La chaleur de fusion sera utilisée de manière expérimentale à grande échelle dans le tokamak d'Iter (Le tokamak est une machine expérimentale conçue pour démontrer la faisabilité scientifique et technique de l'énergie de fusion. ITER sera la plus grande installation de ce type au monde, avec un grand rayon de plasma de 6,2 m et un volume de plasma de 840 m<sup>3</sup>), en vue d'une éventuelle exploitation industrielle à fin du XXI<sup>e</sup> siècle/début du XXII<sup>e</sup>. [1, 2]

## ***1.3 Classification***

En fonction des points de vue et/ou des besoins, les formes d'énergie sont classifiées et quantifiées comme suite.

### *1.3.1 Énergies primaires et secondaires*

De manière à comptabiliser les consommations d'énergie sans omission ou double comptage, a été créée la notion de consommation d'énergie primaire.

#### **A. Les sources d'énergie primaire**

Les sources d'énergie primaire sont celles pour lesquelles la consommation peut être mise directement au service des hommes. C'est le cas, par exemple, du charbon utilisé pour sa combustion, ou du gaz utilisé pour un chauffage central. A contrario les consommations d'énergie en vue de produire une autre forme d'énergie libre (comme le gaz utilisé pour produire de l'électricité) ne sont pas comptées

dans les consommations primaires. Les principales sources d'énergie primaire directement utilisables pour la production d'énergie sont, [3-5]:

- L'uranium ;
- Le charbon ;
- Les hydrocarbures ;
- Le pétrole ;
- Le gaz naturel ;
- La biomasse.

Certaines sources d'énergie primaire ne peuvent être utilisées dans leur état initial, et doivent donc être exploitées afin d'être transformées en source d'énergie secondaire. C'est principalement le cas :

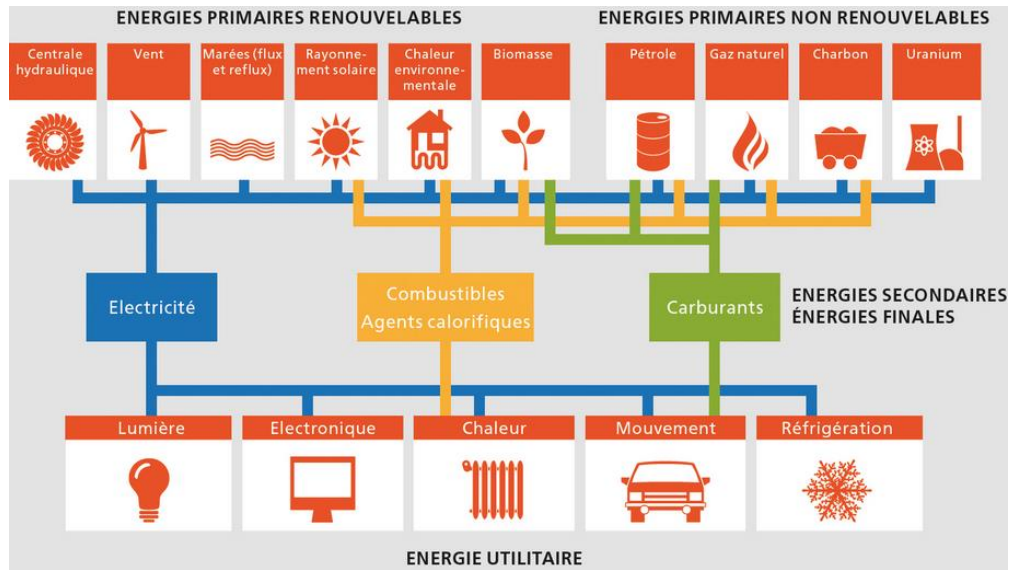
- Des cours d'eau et chutes d'eau ;
- De la puissance des courants marins ;
- Des rayons du soleil ;
- De la force du vent ;
- De la géothermie.

#### B. Les sources d'énergie secondaire

Les énergies dites secondaires ont en revanche un mode de consommation intermédiaire, elles sont obtenues grâce à la transformation d'énergie et participent à des processus reproductibles. L'énergie secondaire est donc plus simple à stocker, à transporter, et à utiliser, elle est obtenue grâce à la transformation d'énergie. On distingue différentes sources d'énergie secondaire, [3, 4]:

- L'énergie nucléaire ;
- L'énergie hydroélectrique ;
- L'énergie produite par centrales thermiques à flamme ;
- L'énergie éolienne ;
- L'énergie géothermique ;
- L'énergie solaire photovoltaïque ;
- L'énergie solaire thermique à concentration ;
- La cogénération.

L'impartial de la transition énergétique consiste à valoriser les énergies secondaires ayant le bilan écologique le plus favorable. Dans le cadre de ces efforts, on distingue donc les énergies fossiles, des énergies renouvelables, voir figure I-1.



**Figure I-1.** Les sources d'énergies renouvelables ou non renouvelables (fossiles) [3].

### I.3.2 Les Sources d'Énergies Renouvelables ou Non Renouvelables

Pour ce qui relève des considérations de développement durable, les sources d'énergie sont fréquemment classées en deux catégories : renouvelable et non renouvelable. Le terme renouvelable n'est d'ailleurs pas à prendre au sens propre, il conviendrait de dire "renouvelable à l'échelle humaine" puisque le soleil qui en est le moteur essentiel direct ou indirect a une durée de vie limitée. Dans la première figurent les énergies solaires (énergies radiatives), les énergies éoliennes (énergies cinétiques), la biomasse (énergies chimiques), les énergies hydrauliques (énergies cinétiques). Dans la seconde, les énergies fossiles (énergies chimiques) et nucléaires sont répertoriées. Au sens strict, les énergies fossile et nucléaire pourraient être aussi considérées comme renouvelables mais sur des périodes trop longues pour être prises en compte à l'échelle humaine.

### I.3.3 Les Sources d'Énergies Renouvelables

Les sources d'énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels: Le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux. Les sources d'énergies dont l'utilisation ne diminue pas la ressource à l'échelle d'une vie humaine. Les énergies renouvelables sont celles qui proviennent de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition aux énergies fossiles dont les stocks s'épuisent [4].

On qualifie les énergies renouvelables d'énergies "flux" par opposition aux énergies "stock", elles-mêmes constituées de gisements limités de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz, uranium). Contrairement à celle des énergies fossiles, l'exploitation des énergies renouvelables n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Mais elles sont encore sous-exploitées par rapport à leur potentiel puisque ces énergies renouvelables ne couvrent que 20 % de la consommation mondiale d'électricité.

#### A. L'énergie solaire

Excepté les énergies nucléaire et géothermique, pratiquement, toutes les énergies utilisées par l'être humain (ses besoins alimentaires, domestiques et industriels) sont originaires du soleil (énergie solaire), l'étoile la plus proche de la terre.

Le soleil est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies, ces dernières sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. Mais nous pouvons aussi recueillir l'énergie du soleil directement pour des fins de chauffage et de production de l'électricité.

**L'énergie solaire** est produite grâce au rayonnement ou à la chaleur du soleil. Les installations PVs convertissent la lumière des rayons solaires en électricité.

L'énergie solaire thermique récupère quant à elle la chaleur du soleil via des capteurs thermiques. L'énergie solaire est une énergie verte prometteuse, mais son rendement reste assez faible. Des contraintes existent autour des conditions d'ensoleillement où sont situées les différentes installations.

#### B. L'énergie hydraulique

**L'énergie hydraulique:** Elle consiste à transformer l'énergie de l'eau en électricité. Les installations hydroélectriques comportent le plus souvent un ouvrage de retenue comme un barrage pour stocker l'eau et la réorienter ensuite vers une centrale dans laquelle l'eau met la turbine en mouvement. Plus ces retenues sont importantes, plus la production est performante et peut répondre aux pics de consommation.

La construction de barrages n'est cependant pas sans poser certains problèmes sur la biodiversité, l'impact environnemental de l'énergie hydraulique n'est donc pas neutre. Le coût économique et social de la construction de nouvelles retenues d'eau est très élevé, la mise en eau d'un barrage nécessitant souvent l'expropriation de nombreuses personnes.

#### C. L'énergie éolienne

**L'énergie éolienne** permet de produire de l'électricité à partir de la puissance du vent. Il s'agit d'une énergie propre avec un bilan écologique très favorable, mais qui rencontre certaines oppositions



des populations vivant aux alentours des éoliennes, soucieuses notamment de préserver l'authenticité du paysage.

#### D. L'énergie géothermique

**La géothermie** consiste à exploiter la chaleur des sous-sols pour produire de l'énergie. Elle ne produit aucun déchet et sa production de CO<sub>2</sub> est très faible. Contrairement à l'énergie solaire ou éolienne, son rendement n'est pas contraint par les conditions météorologiques de la zone d'installation. Peu de gisements sont cependant adaptés à la géothermie haute énergie. La surexploitation de certains gisements peut par ailleurs conduire à une chute de la température de son sous-sol, ce qui fait de la géothermie une énergie seulement partiellement renouvelable. Elle n'en demeure pas moins une énergie intéressante pour chauffer des logements individuels.

#### E. L'énergie biomasse

**L'énergie de la biomasse** est produite à partir de matières biologiques renouvelables : le bois, les plantes, les résidus de récoltes agricoles, les déchets solides renouvelables... On peut valoriser la biomasse solide par combustion, mais également produire des biogaz et des biocarburants à partir de matières premières organiques.

La combustion de la biomasse produit des gaz à effet de serre, mais la croissance des arbres réabsorbe ensuite le dioxyde de carbone libéré dans l'atmosphère. L'impact écologique de la biomasse est donc considéré comme neutre, [3].

### I.3.4 Les Sources d'Énergies Non Renouvelables (Les combustibles fossiles)

Un fossile (qui est fouillé) est le reste d'un animal ou d'un végétal (coquille, carapace, os, dent, graine, feuilles. C'est la raison pour laquelle on parle d'énergies "fossiles".

Donc, on appelle combustible fossile tous les combustibles riches en carbone, essentiellement des hydrocarbures, issus de la méthanisation d'êtres vivants morts et enfouis dans le sol depuis plusieurs millions d'années, jusqu'à parfois 650 millions d'années. Il s'agit du pétrole, du charbon, de la tourbe et du gaz naturel. Parmi ces derniers, le méthane (CH<sub>4</sub>) présente le rapport H/C le plus élevé, alors que l'antracite et certaines houilles sont composés de carbone presque pur.

### I.3.5 Le Nucléaire : un cas particulier

L'énergie nucléaire est produite à partir d'une matière première, l'uranium. À proprement parler, il s'agit donc d'une énergie fossile. Elle est cependant considérée comme une énergie plus « propre » que les autres énergies fossiles, dans la mesure où sa production n'émet pas de dioxyde de carbone. Elle suscite néanmoins de vifs débats autour de la sécurité des installations et du stockage des déchets radioactifs, qui demeurent dangereux pour les espèces vivantes durant de très longues périodes.

La pollution liée à l'extraction de l'uranium fait également polémique, car les poussières et particules fines générées pendant le processus sont souvent rejetées à l'air libre, pénalisant la sécurité sanitaire des populations environnantes.

### I.3.6 L'émission de CO<sub>2</sub>

Lorsqu'il s'agit de traiter la problématique des gaz à effet de serre, les sources d'énergie sont classées en deux catégories. Dans la première, celles ne générant pas de CO<sub>2</sub> dans leur utilisation. Y figurent les énergies éolienne, solaire, hydraulique et nucléaire. Dans la seconde, les autres. Cette différenciation mérite cependant d'être analysée avec plus de finesse. Certaines générations de panneaux photovoltaïques peuvent émettre par leur fabrication, leur acheminement et leur installation, une quantité de CO<sub>2</sub> du même ordre de grandeur que ce qu'ils font économiser dans leur utilisation ultérieure.

### I.3.7 Unités de mesure et chiffres clés

Le système international a choisi, comme unité pour l'énergie, le joule du nom d'un physicien anglais du XIX<sup>e</sup>, James Prescott Joule. Le joule est cohérent avec des unités plus usitées que sont le kilogramme, le mètre et la seconde. Cependant, cette unité s'avère trop importante pour des raisons pratiques lorsqu'il s'agit d'étudier le mouvement d'un électron par exemple ou trop faible lorsqu'il s'agit de mesurer la consommation d'énergie d'un foyer et a fortiori la production d'énergie d'une tranche de centrale nucléaire. C'est ainsi que de nombreuses autres unités sont utilisées, de l'électron volt au kilowattheure vers le térawattheure, ou encore les tonnes d'équivalent pétrole.

### I.3.8 Futur

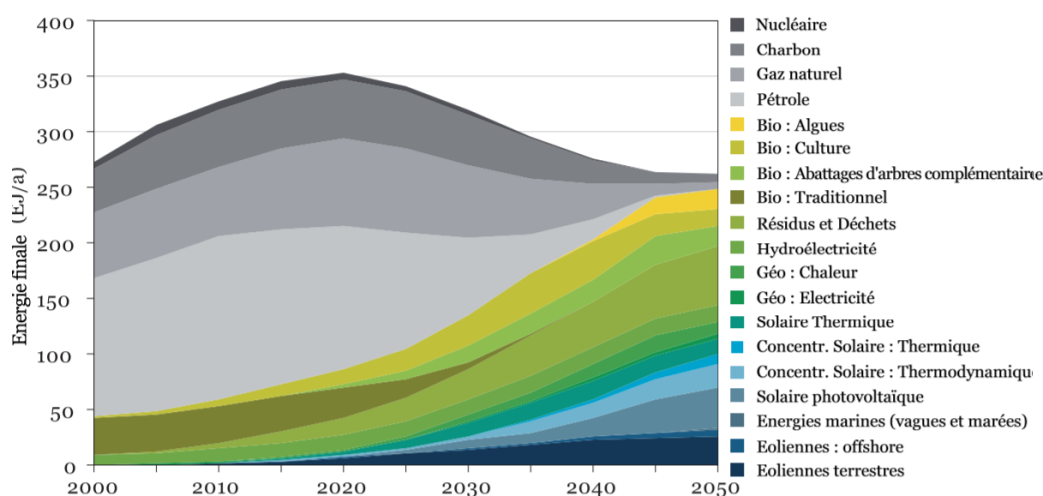
L'histoire de l'homme a été substantiellement marquée par les énergies libres auxquelles il pouvait avoir accès. Aujourd'hui, l'énergie est un facteur systématique et incontournable des activités humaines. Le futur s'inscrira probablement dans la même problématique. L'accroissement de la population

de la planète, l'augmentation du niveau de vie des habitants des pays émergents, le caractère fini et donc limité des réserves d'énergies fossiles contribueront à augmenter et tendre les besoins d'énergie libre. Face à cela, les réponses devront être trouvées dans une utilisation plus efficace de l'énergie, dans un surcroît d'utilisation des énergies renouvelables et nucléaires. La vitesse respective d'évolution de ces facteurs antagonistes créera les conditions d'un développement harmonieux de l'économie mondiale ou au contraire une crise d'approvisionnement mondiale aux conséquences potentiellement tragiques.[2,3]

## 1.4 Les réserves et tendances d'énergie mondiale

La demande mondiale en énergie est en croissance rapide et les ressources naturelles d'énergie sont en décroissance en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie. Les réserves des ressources naturelles d'énergie mondiale telle que l'uranium, le gaz, le pétrole et le charbon par rapport à la demande annuelle sont limités. De nos jours, la production mondiale d'énergie est réalisée à 74 % à partir de combustibles fossiles (pétrole...), à 20 % par les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien...) et à 6 % par le nucléaire

La demande mondiale en énergie primaire dans la dernière décennie, montre bien que le développement des énergies renouvelables est une réalité, comme c'est présenté, Dans la figure I-2 on présente l'approvisionnement énergétique mondial par source d'après le Scénario Energie d'Ecofys, en décembre 2010 [4], et dans la Figure I-3le Scénario pour la capacité de production d'énergie installée dans le monde, [5]



**Figure I-2 Approvisionnement énergétique mondial par source**

*Scénario Energie d'Ecofys, décembre 2010 [5]*

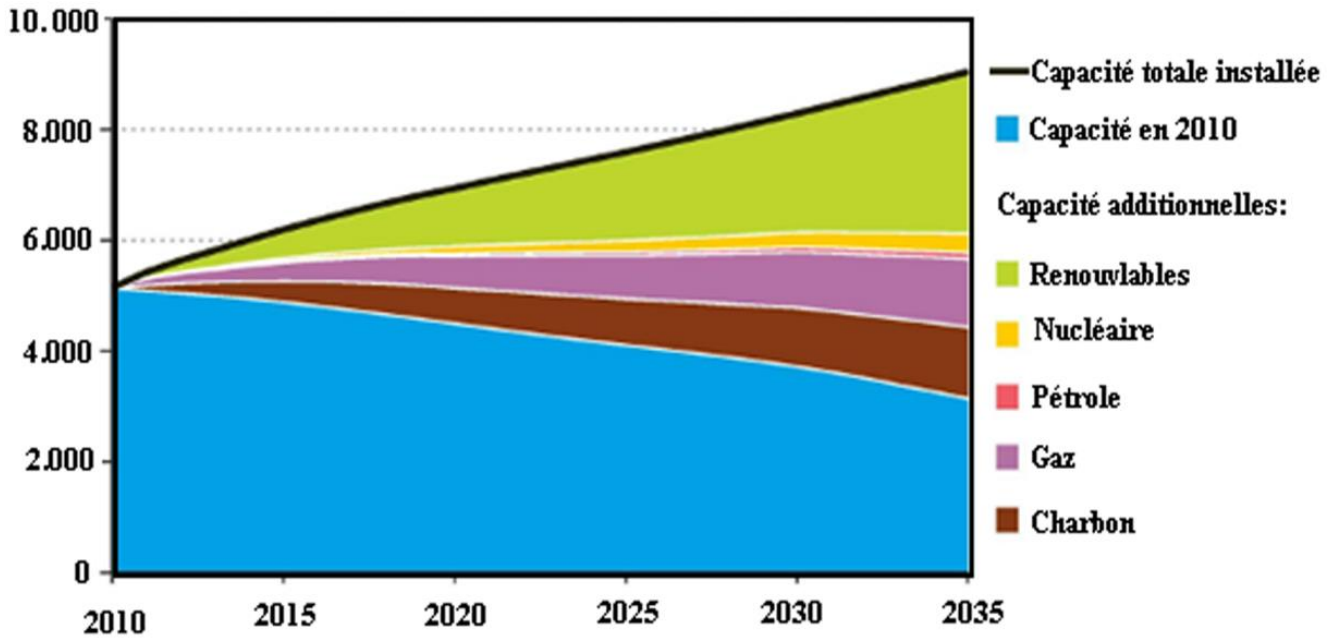


Figure I-3 Scénario pour la capacité de production d'énergie installée dans le monde[3]

Dans la figure I-4 et 5, on montre la consommation totale d'énergie par chaque source d'énergie [2].

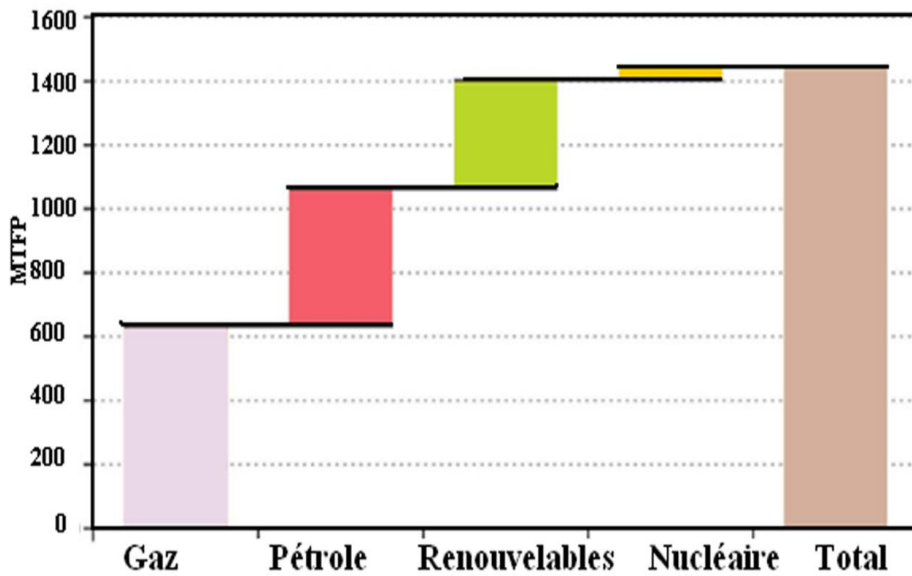


Figure I-4 Évolution de la demande mondiale en énergie primaire en Million de Tonne d'Équivalent Pétrole (MTEP) (charbon non inclus). [3]

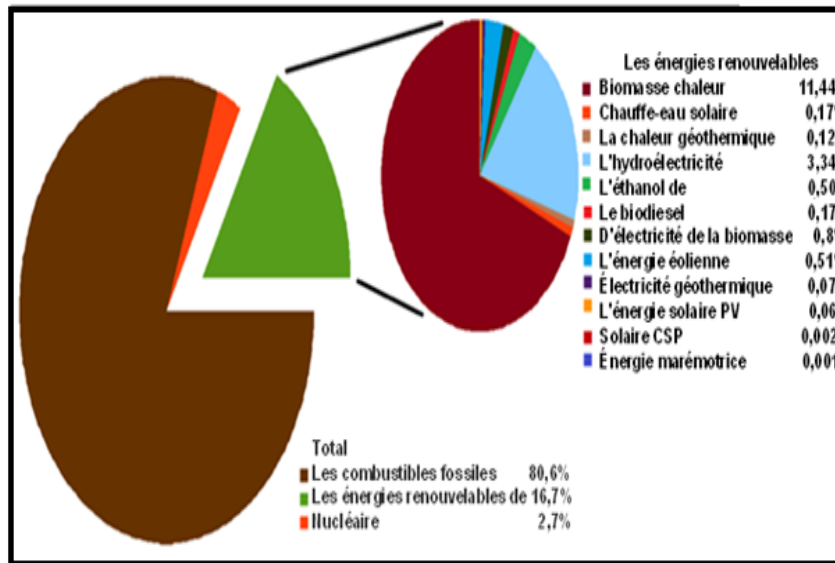


Figure I-5 La consommation totale d'énergie par source en 2010[3]

## 1.5 Les Ressources Mondiales en énergie fossile

Ces sources en énergie fossile ne sont pas renouvelables car elles demandent des millions d'années pour se constituer et qu'elles sont utilisées beaucoup plus rapidement que le temps nécessaire pour recréer des réserves. L'utilisation de combustibles fossiles a plus que doublé depuis les années 1970. Ils représentaient en 2002 environ 80 % des 10 078  $M\text{Tep}$  d'énergie consommée dans le monde, [4].

### 1.5.1 Classification

Les combustibles fossiles sont généralement classés en deux grandes catégories:

#### A. Conventionnels

Les combustibles fossiles conventionnels représentent la quasi-totalité de la consommation d'énergies fossiles, citant comme exemple en 2005.

- Le pétrole: environ 35 % de l'énergie consommée dans le monde ;
- Le charbon: environ 25 % de l'énergie consommée dans le monde ;

- Le gaz naturel: environ 20 % de l'énergie consommée dans le monde;
- Le lignite: principalement consommé en Allemagne.[2, 5].

## B. Non Conventionnels

Parmi les combustibles fossiles non conventionnels, on peut citer :

- les schistes bitumineux ((en) *oil shale*) contenant du kérogène, qui doit encore être pyrolysé ;
- les sables bitumineux ((en) *oil sands*) contiennent du bitume ;
- les hydrates de méthane ;
- la tourbe est un peu à part, son cycle de formation se compte en milliers d'années, ce qui la place à mi-chemin entre les carburants fossiles (dont la formation se compte en millions d'années) et les renouvelables ;
- le gaz de schiste ;
- les huiles de schiste ;
- le gaz de couche, gaz de houille, plus connu sous le nom de grisou.

### 1.5.2 Réserves

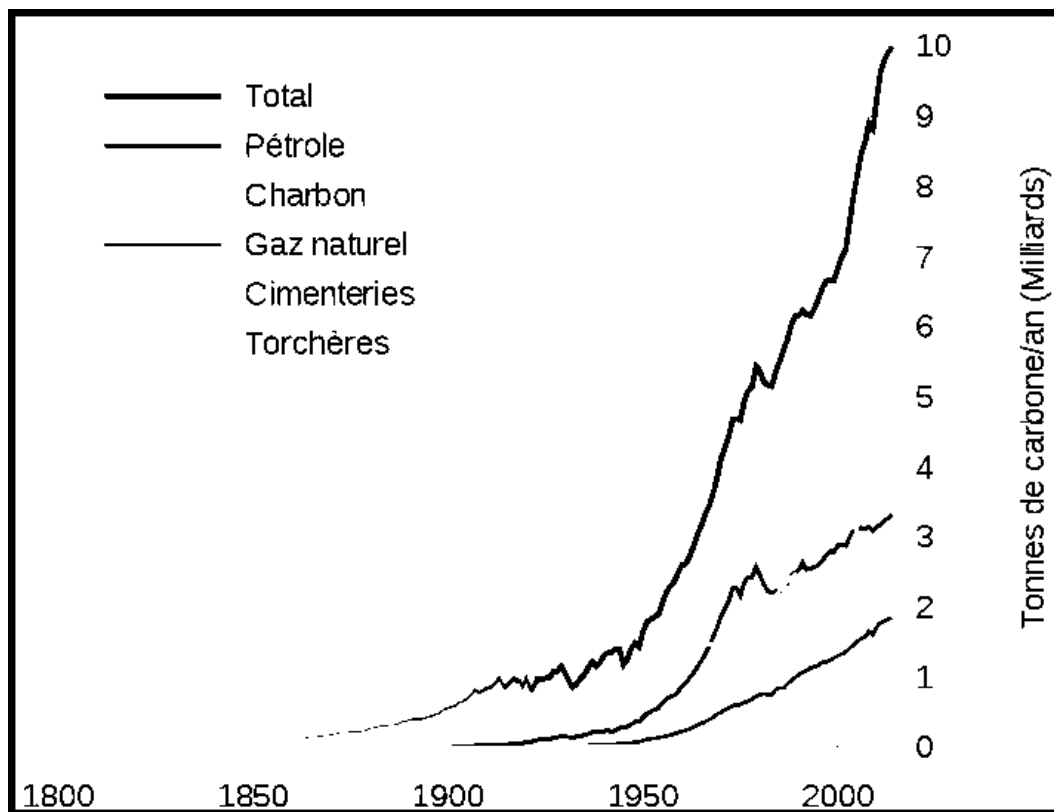
Les réserves prouvées de combustibles fossiles dans le monde en 2013 sont les suivantes:

- **Pétrole brut** : 1638 milliards de barils (Venezuela : 297,8 milliards de barils, Arabie saoudite: 265,4 milliards de barils et Canada: 173,1 milliards de barils) ;
- **Gaz naturel** : 192,3 billions de mètres cubes (Russie: 47,8 billions de mètres cubes, Iran: 33,6 billions de mètres cubes et Qatar: 25,2 billions de mètres cubes) ;
- **Charbon** (au 1<sup>er</sup> janvier 2009): 858,3 milliards de tonnes (946,1 milliards de short tons) (États-Unis: 234,5 milliards de tonnes, Russie: 157,3 milliards de tonnes et Chine: 114,5 milliards de tonnes).

Les ressources sont inégalement réparties à l'échelle planétaire. Pour le pétrole, les 3 pays les mieux dotés possèdent 45 % des réserves mondiales totales, et les 20 premiers pays plus de 95 %. En ce qui concerne le gaz, les 20 premiers pays détiennent plus de 91 % des réserves prouvées. Finalement, environ 60 % des réserves de charbon sont détenues par 3 pays.

## 1.6 Avenir

Actuellement, l'utilisation par l'humanité de quantités considérables de combustibles fossiles est à l'origine d'un déséquilibre important du cycle du carbone, ce qui provoque une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre et, par voie de conséquence, entraîne des changements climatiques. On montre dans la Figure I-6 l'Émissions globales de carbone fossile par type de combustible de 1800 jusqu'à 2000.



**Figure I-6** Émissions globales de carbone fossile par type de combustible[5].

Remarque: Le carbone ne représente que 27 % de la masse du CO<sub>2</sub>, l'oxygène constitue le reste

Les réserves de combustibles fossiles de la planète se renouvellent bien plus lentement que leur vitesse de consommation actuelle, ce qui a laissé présager leur épuisement au cours des prochaines décennies. Pour donner un ordre de grandeur de la vitesse d'utilisation des combustibles fossiles, on considère que, au rythme actuel, l'humanité aura épuisé en moins de 200 ans les réserves accumulées pendant plusieurs centaines de millions d'années (pour fixer les idées, on prendra 200 millions d'années, sachant que le carbonifère dura environ 60 millions d'années). On constate ainsi que l'humanité épuise

les réserves de combustibles fossiles environ un million de fois plus vite que ce que la nature a mis pour les constituer.

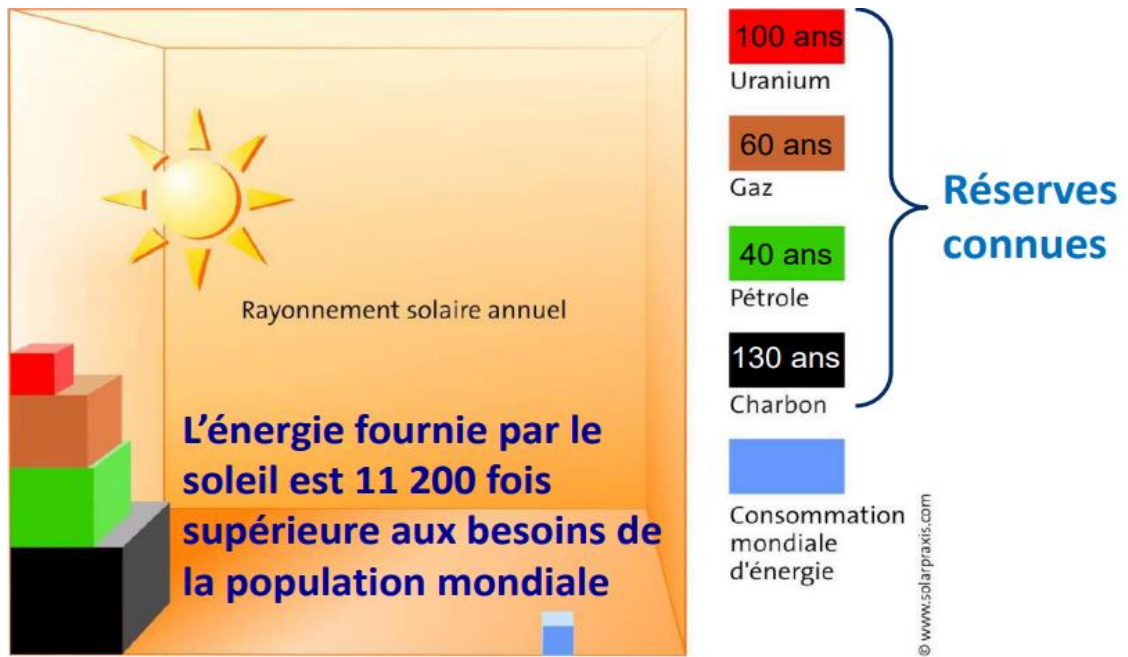
La théorie du pic pétrolier (ou de pic de Hubbert), popularisée au début des années 2000, prédisait la survenue sous quelques années du moment où la production mondiale de pétrole plafonnerait et commencerait à décliner en raison d'un épuisement des ressources disponibles. Ces prédictions ont cependant été rendues caduques à la suite de la crise économique de 2008, qui a entraîné un affaiblissement de la demande mondiale. L'entrée en exploitation du pétrole de schiste aux États-Unis et dans d'autres pays à partir de 2010 a quant à elle contribué à étendre les réserves exploitables, repoussant d'autant la perspective d'un épuisement du pétrole. En 2014, l'Agence internationale de l'énergie prévoyait une hausse de 15 % de la production mondiale de pétrole d'ici 2040, en fonction d'arbitrages opérés par les pays de l'OPEP.

La part des énergies fossiles dans le mix énergétique mondial devrait passer de 82 % en 2014 à 75 % en 2040, au profit d'une progression des énergies renouvelables. Par contre dans le Rapport Energie 2011, WWF International en partenariat avec ECOFYS, OMA, estime que d'ici 2050 on peut atteindre 100 % d'énergie renouvelable en s'affranchissant des ressources d'énergies fossiles, [5].

Le tableau I-1 et *Figure I-7a* présentent les dates d'épuisement des réserves des énergies non renouvelables (par rapport à l'évolution actuelle de la consommation)

<b>Réserves</b>	<b>Production et consommation</b>	<b>Durée estimée par réserves</b>
<b>Charbon</b>	25 % des besoins énergétiques mondiaux sa consommation et production ne cesse d'augmenter	Les réserves sont plus importantes que les réserves pétrolières. 150 ans environ
<b>Pétrole</b>	Environ 35 % des besoins énergétiques mondiaux sa production tend à diminuer	50 ans environ
<b>Gaz Naturel</b>	Environ 25 % des besoins énergétiques mondiaux sa production tend à diminuer	40 ans environ



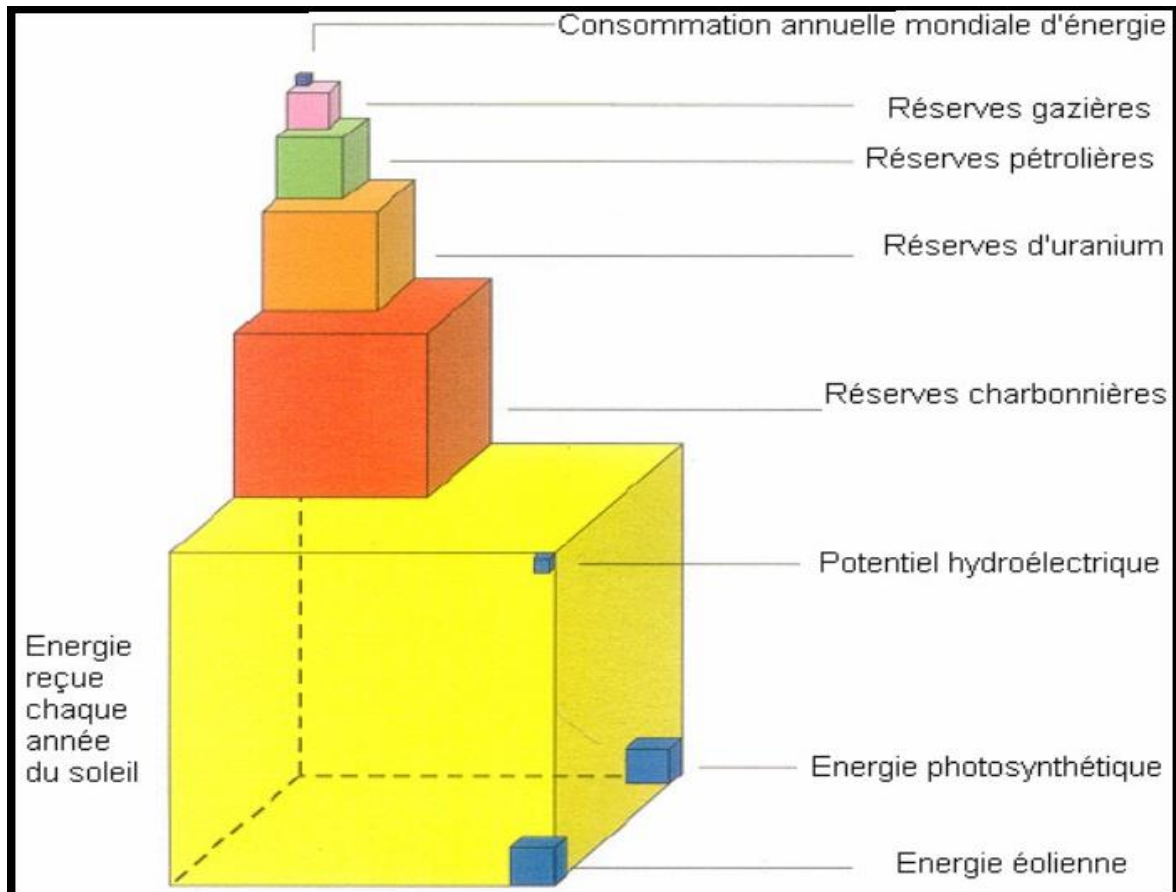


*Figure I-7a* présente les dates d'épuisement des réserves des énergies non renouvelables

## 1.7 Gisement solaire

### 1.7.1 Evaluation du gisement solaire local

Les cellules photovoltaïques exploitent une ressource : l'énergie solaire. Il s'agit d'une ressource renouvelable et très abondante, à l'inverse des énergies fossiles et fissiles. Elle est largement suffisante pour subvenir à l'ensemble des besoins énergétique de l'Humanité, à condition d'être en mesure de pouvoir l'exploiter avec des rendements et des coûts supportables [6]. Avant de s'intéresser aux rendements de conversion (rayonnement solaire vers l'électricité) des cellules photovoltaïques, il convient de savoir évaluer le gisement solaire local, (voir figure I-7).



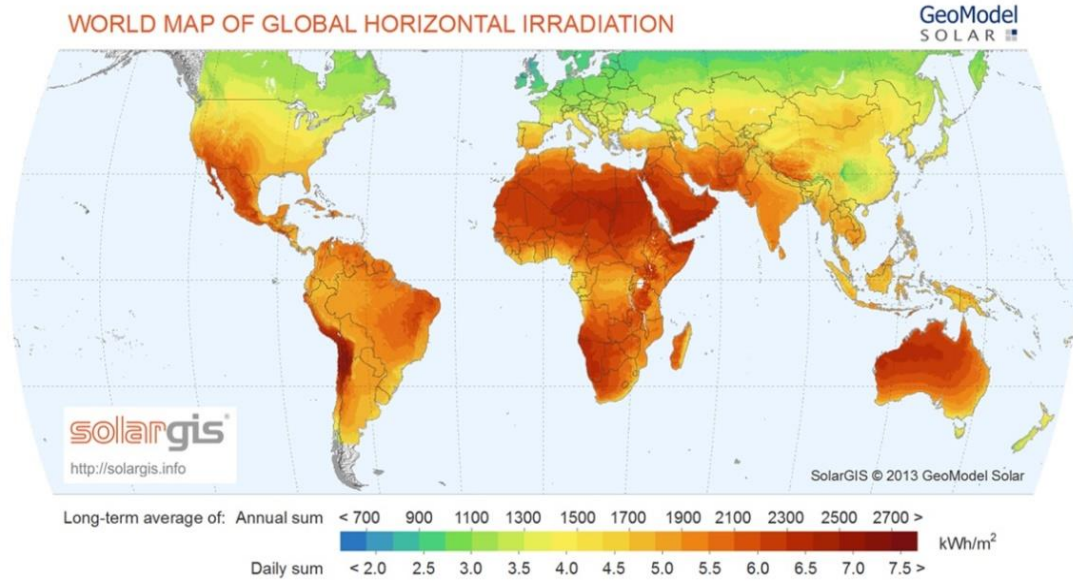
**Figure I-7b.** Potentiel de l'énergie solaire par rapport aux autres énergies [6]

### 1.7.2 Influence de la localisation

La ressource solaire est partout présente mais inégalement répartie. On constate une variation dans un facteur de 1 à 3.5 dans les zones peuplées par l'Homme. Le 1<sup>er</sup> paramètre est la latitude, c'est-à-dire la distance par rapport à l'équateur. L'irradiation solaire diminue au fur et à mesure qu'on se rapproche des pôles (ou qu'on s'éloigne de l'équateur).

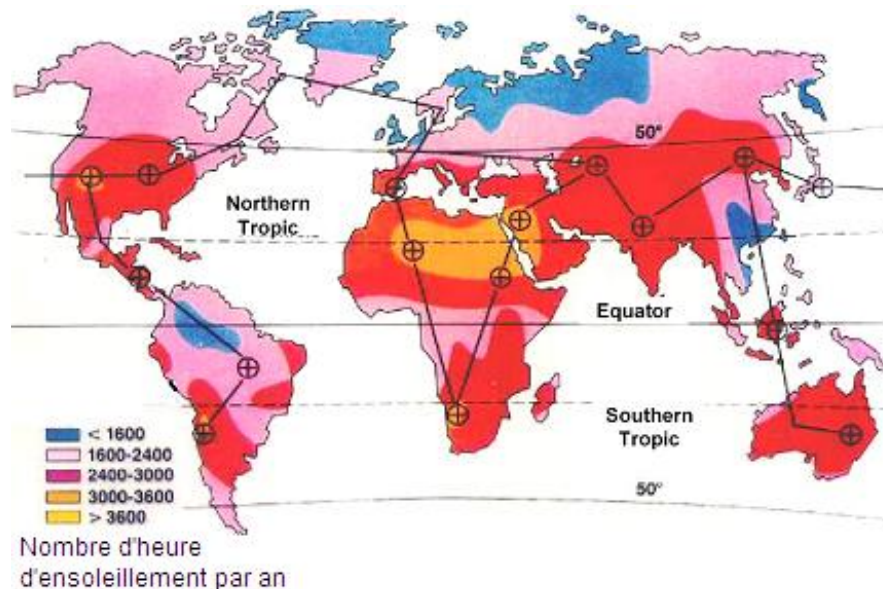
La nébulosité du site est également une variable. On remarquera en ce sens que les zones arides à très faibles nébulosité sont les plus soumises aux fortes irradiations solaires (désert d'Atacama au Chili, désert du Sahara en Afrique) comme c'est présenté dans la figure I-8. L'Algérie peut être divisée en 8 zones climatiques qui ont approximativement un ensoleillement homogène. L'énergie solaire en Algérie représente un potentiel significatif. En effet, le pays reçoit plus que 3000h de soleil par an avec un niveau d'ensoleillement élevé. La moyenne annuelle globale d'ensoleillement solaire reçue quotidienne varie entre 5 à 7 kWh / m<sup>2</sup>.

A ce titre, il apparaît une inégalité entre le territoire Algérien : pour un même investissement, la production photovoltaïque est quasiment variable dans le sud que dans le nord, [6].



**Figure I-8.** Carte mondiale de l'irradiation solaire globale, (annuelle et journalière moyenne)

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement (> 10 heures/jour pendant plusieurs mois, voir figure I.9). Notre pays peut couvrir certains de ces besoins en énergie solaire, ces avantages pourraient être rentables dans les régions isolées surtout dans les applications du pompage.



**Figure I-9.** Cartographe mondiale de nombre d'heure d'ensoleillement par an

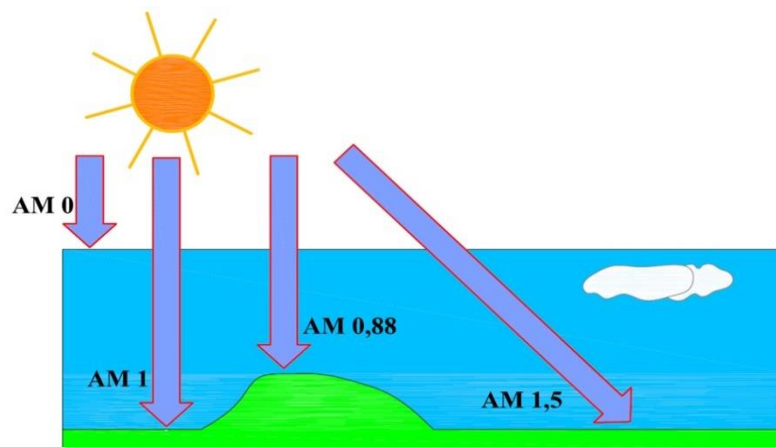
[Source : Lahmeyer International].

### 1.7.3 Coefficient Air-Masse

Le soleil émet continuellement une énergie radiative considérable dans toutes les directions du système solaire. Une moyenne de  $1367 \text{ W/m}^2$  de cette énergie atteint le bord externe de l'atmosphère terrestre. Celle-ci absorbe et reflète une partie de ce rayonnement solaire de telle sorte que le l'énergie reçue au niveau de la surface de la mer (altitude 0 m), par ciel clair et quand le soleil est au zénith, vaut  $1000 \text{ W/m}^2$ . Cette situation a été définie par la communauté scientifique comme une situation de référence décrite par l'indicateur Air-Masse, notée AM 1. Le coefficient Air-Masse évalue la masse atmosphérique traversé par le rayonnement solaire.

Lorsqu'on s'écarte de cette configuration de référence (en prenant de l'altitude, lorsque le soleil n'est plus au zénith ou bien lorsque l'atmosphère est polluée), le coefficient Air-Masse évolue plus ou moins. On parle alors de coefficient AM "X". Le nombre "X" indique que le parcours du rayonnement solaire est X fois supérieur au parcours de référence (AM1), et sera donc plus ou moins filtré comme c'est illustré dans la figure I-10, [6, 7].

On remarque également que les zones de fortes urbanisations présentent un déficit d'irradiation solaire lié à la présence de pollution atmosphérique qui sont d'autant d'éléments absorbants du rayonnement.



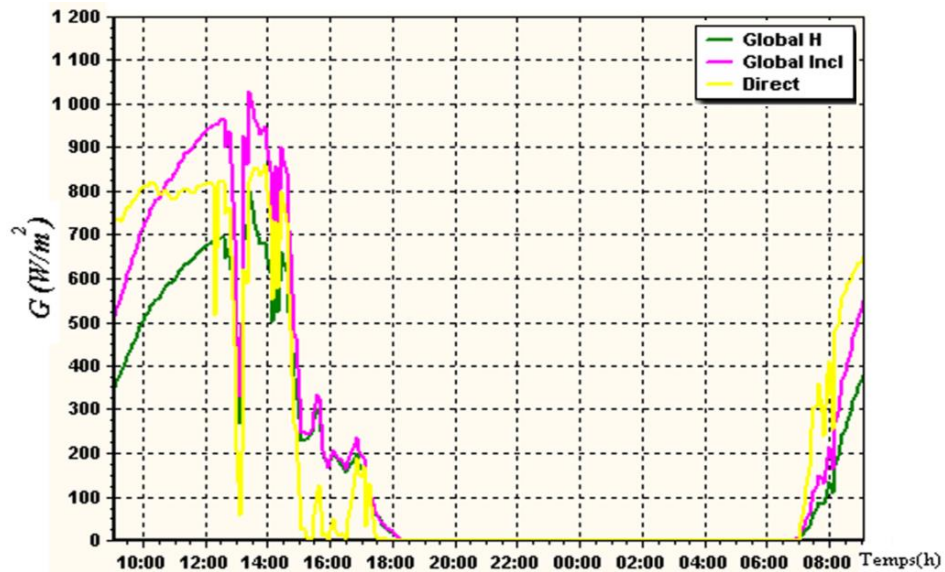
*Figure I-10. Le nombre d'air masse AM*

Dans le domaine du photovoltaïque autonome, l'échelle de temps pour l'évaluation du gisement solaire est la journée. On exprimera communément le gisement solaire en kWh/jour ou bien en kWh/m<sup>2</sup>/jour. Ce gisement solaire journalier dépend, comme nous venons de le voir de la localisation, mais également de la période de l'année.

### 1.7.4 Où trouver les données météorologiques ?

La conception d'un système photovoltaïque passe la connaissance du gisement solaire journalier du site, ce qui n'est pas tout-à-fait possible avec les cartes générales. Pour ce faire, il convient de s'adresser aux services météorologiques nationaux et internationaux qui enregistrent et archivent les données d'ensoleillement journalier mois par mois. Tout concepteur pourra trouver les données journalières dont il a besoin pour dimensionner son installation photovoltaïque. La figure I-11 illustre un exemple de mesures

radiométriques relevées en temps réels effectuées au niveau de la Station de Mesure Radiométrique et Météorologique du site CDER Bouzareah (Alger), [6].

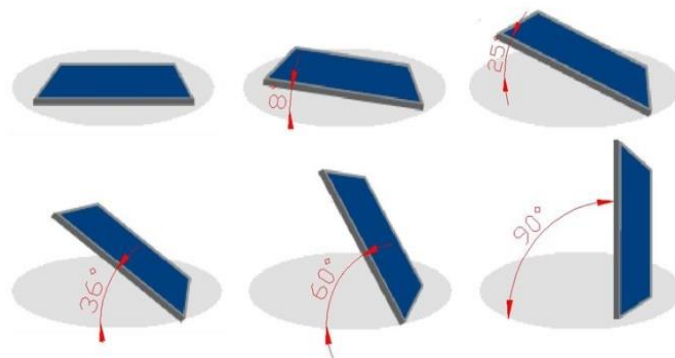


**Figure I-11.** Mesures radiométriques relevées en temps réels à Bouzareah le 10/11/2012.

Rayonnement solaire  $G(W/m^2)$  [6]

### 1.7.5 Angle d'inclinaison optimal du champ photovoltaïque d'une installation autonome

L'inclinaison du champ PV d'une installation autonome est un paramètre qui doit être défini de façon subtile en adéquation avec les besoins Elle se mesure en °, (voir figure I-12).



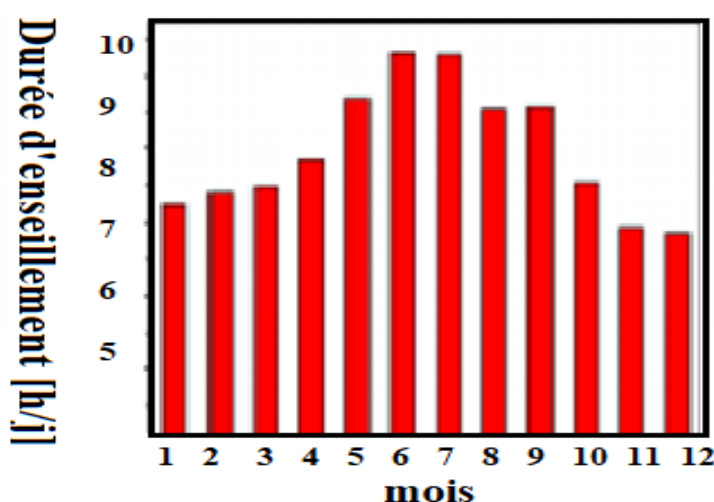
**Figure I.12.** L'inclinaison correspond à la pente du module par rapport à l'horizontale.

#### Cas 1 : Gisement solaire et besoins en opposition de phase

Il s'agit du cas le plus courant dans les zones à climat tempérés comme en Europe. Les besoins en électricité y sont plus importants en hiver qu'en été. Ils suivent une évolution annuelle typique illustrée par la figure ci-dessous. Par ailleurs, le gisement solaire suit une courbe diamétralement opposée.

Dans ce cas, il convient de favoriser une inclinaison qui permet de maximiser l'irradiation solaire reçue durant la période hivernale. En première approximation, l'inclinaison optimale peut se calculer par la formule : latitude du lieu + 10 °. En Algérie, la latitude variant de +9° (sud) à +37° (nord), l'inclinaison optimale du champ PV se situe donc entre 30° et 55°. Par contre la spécification du site de la wilaya de Mascara est comme Coordonnées géographiques: 35° 23'00'' Nord, 0°09'00'' Est, d'Altitude: Min. 0m, Max. 429.3 m, elle est située à 635m d'altitude. L'irradiation solaire varie entre 1000 kWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an, l'inclinaison optimale du champ PV se situe donc entre 30° et 45° voir figure I-13, [6, 7]. Les données d'ensoleillement sont de 2650 à 3500 h/an à raison de 1700 à 2650kWh/m<sup>2</sup>/an.

Toutefois, une inclinaison différente peut être parfois retenue en fonction d'autres critères (albédo, nébulosité spécifique du site, etc..).



**Figure I-13.** Profil standard de l'irradiation solaire journalière en climat tempéré à Mascara) [7]

**\*Formule de calcul de l'inclinaison optimale (installation PV autonome)**

Cette formule de calcul de l'inclinaison optimale (latitude du lieu + 10 °) n'est valable que dans le cas où on souhaite maximiser l'irradiation solaire reçue en hiver et lorsque l'orientation est plein Sud. Si l'orientation n'est pas plein sud, on pourra utiliser la formule approchée suivante :

$$\text{Inclinaison optimale} = (\text{latitude du lieu} + 10^\circ) \times (1 - \text{Orientation}/180^\circ)$$

Par exemple: soit une installation dans une région à latitude = 47°. Les modules sont orientés à 30° vers l'est, alors l'inclinaison optimale serait égale à  $(47^\circ + 10^\circ) \times (1 - 30^\circ/180^\circ) = 47.5^\circ$ .

**Cas 2 : Gisement solaire et besoins en phase**

C'est le cas le plus adapté pour l'utilisation de l'énergie solaire en Autoconsommation, mais malheureusement le moins courant. On rencontre cette situation pour des applications spécifiques, les besoins électriques sont plus importants en été qu'en hiver. On trouve également ce genre de situation dans les

zones à climat tropical où le gisement solaire et les besoins électriques ne varient quasiment pas tout-au-long de l'année.

### 1.7.6 Consommation d'électricité mondiale

En 2017, la Consommation d'électricité mondiale a été environ de 24255 TWh, avec une puissance moyenne de 300 Wc pour  $1,6\text{m}^2$ , dont  $1\text{m}^2$  de module produit 180 kWh.an. La surface nécessaire pour produire 24255 TWh est de  $134750\text{ km}^2$ . Ceci fait une centrale de  $367\text{ km} \times 367\text{ km}$  seulement. En 2018, on a installé dans le monde 300 GWc. <http://www.irreng.org>

## Chapitre-II

## Energie Solaire

### II. 1 Introduction

L'énergie émise par le soleil, sous forme de rayonnements électromagnétiques de longueur d'onde variable, constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. Ce rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8min et 19s, pour atteindre notre atmosphère, sachant que la radiation solaire est de 63,2 Méga Watts/m<sup>2</sup> à la surface du soleil. [7].

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes complexes d'absorption, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. La densité du flux d'énergie incidente reçue par unité de temps par un plan de front de terre, appelée généralement l'éclairement, ou la constante solaire standard, est estimée à 1367 W/m<sup>2</sup>, soit une puissance totale de 3,85×10<sup>23</sup> kW (ce qui correspond à environ 6 millions de tonnes de matière transformée en énergie par seconde). Le soleil fournit ainsi chaque jour à la Terre, par son rayonnement, l'équivalent de plusieurs milliers de fois la consommation énergétique totale de l'humanité pour ses activités d'aujourd'hui). Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre. Hors atmosphère, l'énergie moyenne annuelle reçue par la Terre est d'environ 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/ jour, environ 15.10<sup>17</sup>kWh/an. Le besoin global de la terre (besoins électriques, énergie thermique et transport) est de 30.10<sup>13</sup>kWh/ an, le soleil fournit donc annuellement 5000 fois les besoins énergétiques globaux de la terre

Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons lumineux, on introduit la notion du nombre de masse d'air (Air Mass) AMy. On définit ainsi les conditions *AM1* quand le soleil est au zénith et *AM2* quand le soleil est à 30° au-dessus de l'horizon. La condition hors atmosphère est représentée par la notation *AM0*. La condition *AM1.5* est satisfaite lorsque le soleil est à 45° au-dessus de l'horizon. Elle est caractérisée par la distribution spectrale avec un flux solaire de 1000 W/m<sup>2</sup>.

La norme internationale choisie correspond à un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup> pour une traversée d'atmosphère *AM1,5* [7].

On peut ainsi compter sur 1000 W/m<sup>2</sup> dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m<sup>2</sup> lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau. Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend ainsi de plusieurs paramètres comme :



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

À titre d'exemple, pour donner un ordre de grandeur des énergies mises en jeu, une toiture de 100 m<sup>2</sup> avec une durée moyenne d'ensoleillement 8 h/j, reçoit par jour un flux énergétique d'une puissance de 70 kW, soit l'équivalent d'une énergie électrique de 560 kWh ou l'équivalent d'une énergie thermique d'environ 480 000 kcal, ce qui représente 50 L de fuel. On imagine que même un capteur dont le rendement est de 10 % peut récupérer une énergie importante, le problème principal étant le coût de 1 m<sup>2</sup> de capteur [7,8].

Pour les applications de l'énergie solaire, on distingue :

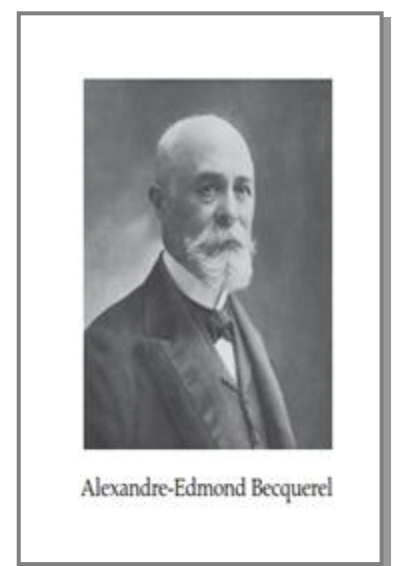
- **L'énergie solaire thermique**: cette application consiste à transformer les rayonnements solaires en chaleur soit pour utilisation directe ou indirect (production d'eau chaude ou chauffage).
- **Le solaire passif** (habitat conçu pour capter chaleur et lumière solaire),
- **Le solaire thermoélectrique** produisant de l'électricité de façon centralisée
- **L'énergie solaire PV** : la production d'électricité à partir des rayonnements solaire est appelé effet PV, en effet à partir de son nom on peut tirer deux mots photo pour les photons et volta pour la tension.

## ***1.2 Energie Solaire Photovoltaïque***

### ***II.2.1 L'histoire de la Photovoltaïque***

L'étude de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Mais la première conversion de la lumière en électricité, appelée effet PV, a été découverte par le physicien français Antoine Edmond Becquerel en 1839, il se traduit par l'apparition d'une tension électrique entre deux électrodes appliquées sur certains matériaux soumis un éclairage. Toutefois, ce n'est qu'en 1883 que le premier état solide cellule PV a été construit par Charles Fritts, qui enduit le SC sélénium d'une couche extrêmement mince de l'or pour former les jonctions. L'appareil n'était que d'environ 1% efficace.

En 1888, le physicien russe Aleksandr Stoletov construit la première cellule photoélectrique basée sur l'extérieur effet photoélectrique découvert par Heinrich Hertz au début de 1887.



En 1905, Albert Einstein a expliqué le mécanisme sous-jacent de l'excitation porteur de lumière provoqué 'l'effet photoélectrique', pour lequel il a reçu le prix Nobel de physique en 1921[7].

Albert Einstein a écrit que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre la création d'un courant électrique.

Russell Ohl brevetée de la cellule à jonction semi-conducteurs modernes solaire en 1946, qui a été découvert en travaillant sur la série de progrès qui conduiraient au transistor. Mais ce n'est qu'à partir de 1954, avec la moderne technologie, fut réalisée la première cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, et que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie. Le rendement était de 6% mais fut rapidement augmenté à 10% [7, 8].

Durant de longues années, la principale application des cellules solaires resta dans le domaine de l'alimentation des véhicules spatiaux, leur développement et de rapides progrès ont été motivés par la conquête de l'espace. Cependant, leur intérêt dans une utilisation terrestre rejaillit que dans les années 70, période du choc pétrolier, dont les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres. Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même est devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, pompes et réfrigérateurs solaires...etc.

### II.2.2 Le "Photovoltaïque" et "l'Effet photovoltaïque"

Le mot "**photo**" vient du mot grec (φωτοζ) ou  $\varphi\omega\zeta$  (phos qui veut dire lumière, clarté) et "**voltaïque**" vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, et d'après qui on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt". Le photovoltaïque signifie littérairement la " lumière électricité ". L'électricité se produit sans bruit, sans parties mécaniques et sans que des produits toxiques soient libérés. Le terme « photo-voltaic » a été utilisé depuis 1849 par les Anglais.

Le système solaire est un système constitué d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie solaire reçue, directement ou indirectement en énergie électrique. Il existe deux différents types de systèmes solaires, avec l'utilisation d'une seule technologie nommée "**Photopile**" (effet physique de certains matériaux "**l'effet photovoltaïque**"), ou plusieurs technologies. L'effet photovoltaïque peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule PV. La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. L'association possible de plusieurs cellules PV en série/parallèle permet d'adapter théoriquement la production d'énergie PV à la demande. Ces associations constituent un GPV

avec des caractéristiques courant-tension  $I(V)$  spécifiques, non-linéaires et présentant des PPM dépendant du niveau d'éclairement, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Pour pouvoir capter et utiliser cette énergie, la connexion à une charge est nécessaire. Il en résulte un point de fonctionnement correspondant au point d'intersection des caractéristiques électriques du GPV et de la charge. Selon les choix des charges envisagées, le régime de fonctionnement obtenu est optimisé ou non. Nous illustrons nos propos à travers des exemples simples de chaînes de conversion de GPV, des propriétés que l'on peut en attendre en fonction de l'éclairage, de la température et de l'influence des charges sur leur production de puissance.

Nous rappelons alors les précautions élémentaires à prendre pour que l'ensemble fonctionne en produisant de l'énergie sans risquer de détériorer le GPV. Nous montrons ensuite la problématique du transfert et conversion du maximum de puissance en schématisant le plus possible une chaîne de conversion élémentaire composée d'un convertisseur statique et en rappelant son principe de fonctionnement lors d'une connexion directe d'un GPV à une charge. Notre objectif est d'apporter des solutions aux problèmes de pertes de production d'énergie en insérant un étage d'adaptation ayant des propriétés ouvrant sur la possibilité de fonctions propres comme une commande MPPT pilotant le GPV. Dans le domaine des commandes MPPT très prolifique actuellement en publications, divers principes existent. Nous expliquerons le principe des plus utilisées actuellement.

### *II.2.3 La cellule solaire photovoltaïque*

Une cellule PV est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (Direct Current-DC).

Le soleil est une étoile vieille de 5 milliards d'années située à 150 millions de kilomètres de la terre et dont le diamètre est 100 fois supérieur à celui de la Terre. C'est l'étoile la plus proche de la Terre. L'énergie qu'elle envoie provient des réactions de fusion nucléaire en chaîne qui engendrent à sa surface un rayonnement d'une puissance estimée à 66 millions de Watts par  $m^2$ . Ce rayonnement énergétique se disperse en s'éloignant de sa source et arrive aux limites de l'atmosphère terrestre avec une puissance de  $1360 \text{ W/m}^2$  en moyenne. Au sol, la puissance n'est plus que de  $1000 \text{ W/m}^2$  en moyenne par fort ensoleillement car l'atmosphère réfléchit et absorbe une partie du rayonnement. C'est une énergie rayonnante composée de plusieurs longueurs d'ondes. La lumière est une énergie rayonnante composée de photons. Elle voyage à  $300\,000 \text{ km}$  par seconde. La lumière

peut être considéré sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde  $\lambda$  ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie  $E_{ph}$  transportée, liée à  $\lambda$  (longueur d'onde en mètres), par la relation suivante [8] :

$$\left( E_{ph} = h \cdot \nu = h \frac{c}{\lambda} \right) \quad (II.1)$$

On peut donner cette énergie de photon exprimée en électronvolts avec sa longueur d'onde exprimée en micromètres par la relation suivante :

$$\left( E_{eV} = \frac{1,2419}{\lambda_{\mu m}} \right) \quad (II.2)$$

Avec :  $E_{ph}$ : Energie en joule

$E_{eV}$ : Energie en eV

$h$  : constante de Plank ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s).

$\nu$  : Fréquence en hertz

$c$  : Vitesse de la lumière en m/s.

#### II.2.4 Les valeurs énergétiques pour diverses longueurs d'ondes

L'énergie rayonnante du soleil suit une course qui varie en fonction du lieu et des saisons. Chaque lieu reçoit cette énergie en fonction de l'azimut et de la hauteur angulaire du soleil. L'azimut est l'angle horizontal formé par le soleil vis à vis du Sud. Par convention, on donne au Sud la valeur zéro. La hauteur angulaire du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan de l'horizon. Cette hauteur est maximale au solstice d'été et minimale au solstice d'hiver, dans l'hémisphère Nord.

L'intensité du rayonnement varie en fonction de l'angle du soleil avec la terre mais aussi de la couche d'air à traverser. Pour une hauteur de  $30^\circ$ , les rayons doivent traverser une masse d'air égale au double de l'épaisseur de l'atmosphère. À des hauteurs de  $20^\circ$  et  $15^\circ$ , les rayons ont à traverser l'équivalent de 3 à 4 fois cette épaisseur. La latitude et les conditions climatiques du lieu déterminent un certain nombre d'heures d'ensoleillement. Dans le Tableau II-1, on présente les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

Tableau II-1: les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	E(ev)	Zone
0,2	6,2	Ultra-violet
0,4	3,1	Visible bleu
0,5	2,48	Visible jaune-vert
0,78	1,59	Visible rouge
1	1,24	Infrarouge
2	0,62	Infrarouge
4	0,31	Infrarouge

### II.2.5 Les types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement global solaire est absorbé et diffusé, en subdivisant en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Donc il y'a quatre type de rayonnement:

- **Le rayonnement direct** : est le rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre ;
- **Le rayonnement diffus** : est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par une pyranomètre avec écran masquant le soleil.
- **Le rayonnement solaire réfléchi** : ou 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) ;
- **Le rayonnement global** : est la somme de tous les rayonnements reçus y compris le rayonnement réfléchi par le sol est les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou par un solarimètre sans écran. Dans la figure II-1 on illustre les appareils de mesure pour les différents types de rayonnement [6]:

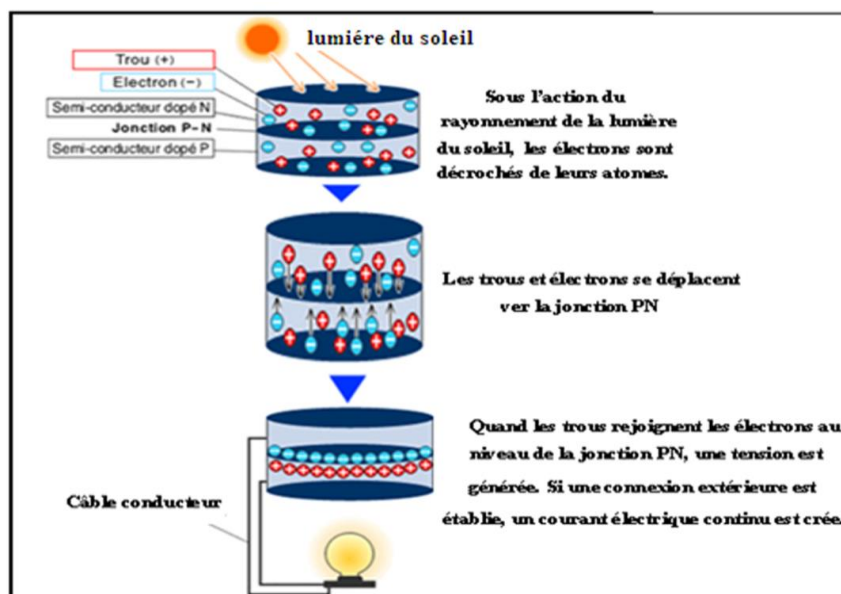


**Figure II-1** les appareils de mesure des différents types de rayonnement Direct (Pyrhéliomètre), Diffuse, Réfléchi, Globale (Pyranomètre) [6].

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons, puis l'énergie des photons excite des électrons qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global. Donc la conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite que :

- les photons soient absorbés par le matériau (absorption optique) en transmettant leur énergie au matériau ;
- l'énergie transmise aux électrons soit une énergie potentielle et non une énergie thermique ;
- les électrons excités par les photons soient collectés avant de reprendre leur énergie initiale (relaxation), afin de fournir un courant électrique.

La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque, comme c'est montré dans la figure II-2. Sous certaines conditions, les photons dont l'énergie est supérieure à  $E_g$  (la largeur de la bande interdite du matériau) peuvent passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction laissant ainsi un trou dans la bande de valence. L'électron et le trou ainsi libérés doivent rapidement être collectés pour participer ensuite à la conduction électrique avant leur recombinaison.

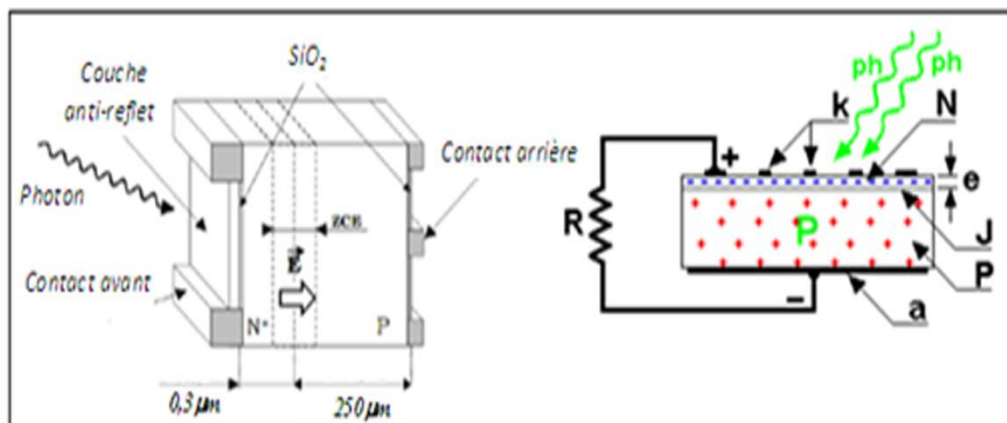


**Figure II-2.** Principe de l'effet photovoltaïque

Les critères d'un convertisseur idéal photon-électron sont les suivantes :

- le dispositif de collecte nécessite un champ électrique important au niveau de la création des paires électron-trou ;
- le matériau semi-conducteur dont la largeur de bande interdite est comprise entre 0,7 et 4 eV est un matériau photovoltaïque du spectre solaire.

La jonction PN sous éclairage, caractérisée par une barrière de potentiel importante au niveau de la jonction et réalisée à partir de matériaux semi-conducteurs photovoltaïques constitués d'un cristal, est la solution actuellement la plus répandue de convertisseur photovoltaïque (d'autres structures, comme les hétérojonctions et les diodes Schottky peuvent également être utilisées). Similaire à une diode utilisée classiquement en électronique, une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore). La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode [8-11]. Dans la figure II-3 on illustre un exemple d'une constitution d'une cellule PV en Si comme matériau PV (image gauche).



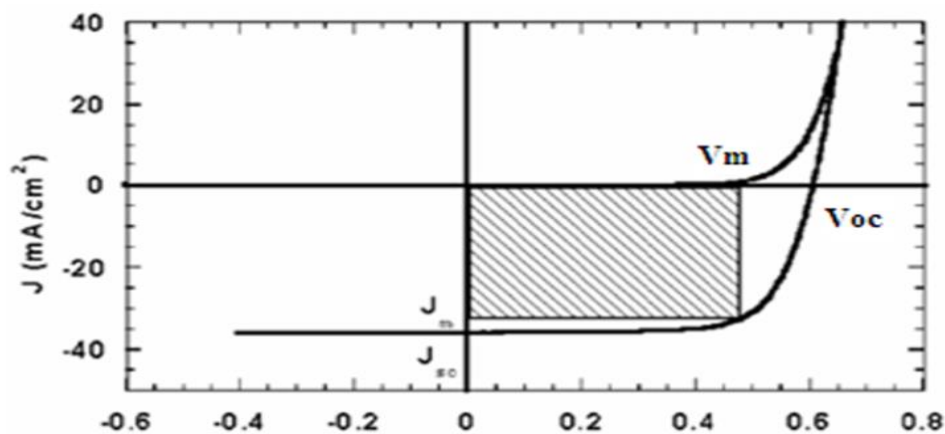
**Figure II-3.** Structure d'une cellule PV, utilisant le Si comme matériau PV (image gauche) ;  
présentation de la jonction PN d'une cellule PV (image droite).

Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région N au pôle négatif d'un générateur et la région P au pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région N, ainsi que les trous libres de la région P, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation. Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région P et les trous dans la région N. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse, les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée.

La jonction PN joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région P ; ces électrons ont tendance à se recombinaison avec les trous présents en grand nombre dans cette région P ; ils le font au bout d'un temps  $\tau$  appelé durée de vie des porteurs minoritaires.

Cette durée de vie est l'un des paramètres fondamentaux qui détermine la qualité de la jonction. Plus  $\tau$  est grand, plus l'effet redresseur est marqué. Le silicium est à ce sujet le meilleur semi-conducteur connu ( $\tau$  peut atteindre la valeur de 1 milliseconde, alors qu'il est de l'ordre de la microseconde pour la plupart des autres semi-conducteurs). Un autre paramètre important est la longueur de diffusion : l'électron injecté dans la région P diffuse sur une certaine distance  $L$  avant de disparaître au bout du temps  $\tau$  ; c'est cette longueur moyenne parcourue par les électrons dans la région P qui est appelée longueur de diffusion. Elle est de l'ordre de plusieurs micromètres pour le silicium.

Si l'on soumet une jonction PN de faible épaisseur à un flux lumineux, des paires électron-trou sont créées par les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau semi-conducteur. Il en résulte une augmentation du courant inverse de saturation proportionnelle au flux lumineux. Physiquement, cet effet se traduit de deux manières selon le quadrant de fonctionnement du dispositif. Dans le 3<sup>ème</sup> quadrant, le système fonctionne en récepteur dont la résistance varie fortement avec l'éclairement, c'est la photorésistance. Dans le 4<sup>ème</sup> quadrant, le système fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0.5 à 0.8V pour Si). C'est la cellule PV à jonction PN, comme c'est illustré dans la figure II-4.



**Figure II-4.** Caractéristique Courant-Tension sous obscurité et sous éclairnement d'une cellule PV.

La caractéristique de la cellule solaire  $I = f(V)$  dans l'obscurité est présentée comme étant une diode au silicium comme suit :

$$I_{CELL} = I_D = I_{SAT} \left( \exp\left(\frac{V_{CELL}}{nV_T}\right) - 1 \right) \quad (II.3)$$



Par contre, si la cellule est subit une illumination, la relation devient :

$$I_{CELL} = I_{CC} - I_D = I_{CC} - I_{SAT} \left( \exp \left( \frac{V_{CELL}}{nV_T} \right) - 1 \right) \quad (II.4)$$

Où :  $I_D$  (A) le courant de la diode ;

$I_{SAT}$  (A) correspondant au courant de saturation ;

$I_{CELL}$ (A), le courant fourni par la cellule ;

$V_{CELL}$ (V), la tension aux bornes de la cellule,

$I_{CC}$  (A), le courant de court-circuit de la cellule (de l'ensoleillement) ;

$n$ , un facteur de non idéalité de la jonction,

$K_B$  (J/K), la constante de Boltzmann, ( $1.3806504 \times 10^{-23}$  J/K)

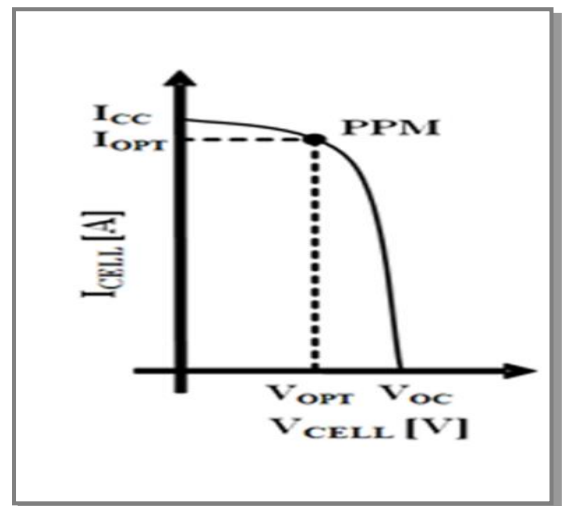
$T$  (K), la température effective de la cellule,

$e$  (C), la charge de l'électron, ( $1.602 \cdot 10^{-19}$  C)

$V_T = \frac{K_B T}{e}$ ,  $V_T$  (V) la potentielle thermodynamique.

Pour la réalisation d'un GPV à partir des cellules PVs, nous nous intéresserons uniquement au quatrième quadrant. Pour cela, nous allons représenter les caractéristiques dans un nouveau repère  $I = f(V)$  donné par la figure II-5, où le courant de saturation inverse est compté positivement. Communément nommée tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) fortement dépendante de la température. Le courant maximal du PV se produit lorsque les bornes de la cellule sont en court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) dépendant fortement du niveau d'éclairement ( $G$  ou  $E$ ), [12, 13].

La figure II-5 illustre la caractéristique non linéaire  $I(V)$  d'un GPV (plusieurs cellules PV) à base de silicium pour un éclairement et une température donnée, avec la présence d'un point de puissance maximal caractérisé par sa tension et son courants optimaux ( $V_{OPT}$  et  $I_{OPT}$ ). Vu le courant engendrer par l'éclairement de la cellule, une cellule PV est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode.



**Figure II-5.** Caractéristique  $I(V)$  d'une cellule PV

(dans le nouveau repère)

Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série  $R_{s(pv)}$  et  $R_{p(pv)}$  modélisant les pertes.

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts faces avant et arrière. Elle caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction, lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule. Elle caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structurales du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle  $R_{p(pv)}$ . L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au Si :  $R_{p(pv)} = 10^2$  à  $10^4 \Omega$ .  $R_{p(pv)}$  augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle. Ainsi, en statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante [14] :

$$I_{CELL} = I_{CC} - I_{SAT} \left( \exp \left( \frac{(V_{CELL} + R_s I_{CELL})}{nV_T} \right) - 1 \right) - \frac{V_{CELL} + R_s I_{CELL}}{R_{p(pv)}} \quad (II.5)$$

Le modèle équivalent électrique représentant le comportement statique d'une cellule photovoltaïque réelle est indiqué dans la figure II-6.

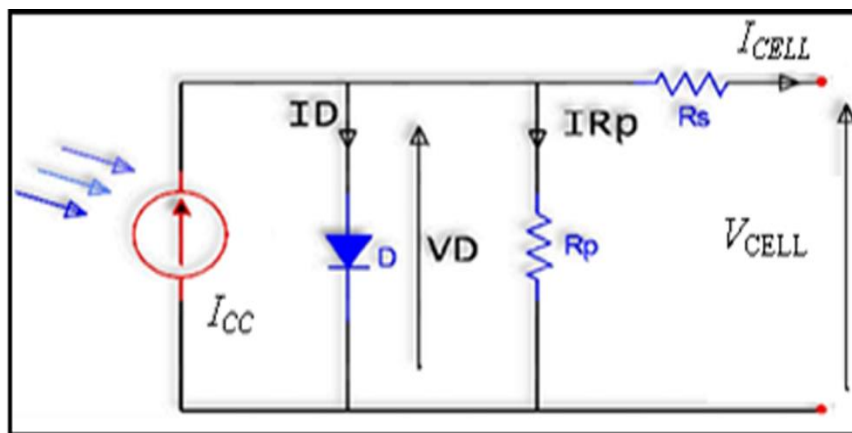


Figure II-6. Modèle équivalent électrique de la cellule photovoltaïque.

Ce modèle simplifié nous permet de modéliser le comportement d'une source d'énergie électrique provenant de capteurs PV. Ainsi, comme illustré sur la figure II.4, la cellule peut être assimilée à une source de tension, à droite du PPM, plus ou moins parfaite en fonction de la pente  $dI/dV$  proche de la verticale et à une source de courant à gauche du PPM. Pour la mise au point des commandes MPPT appropriées, cette modélisation s'avère très utile pour en déduire les performances de ces commandes autour du PPM.

### *II.2.6 Technologies des cellules photovoltaïques*

La question du prix élevé de l'électricité PV est souvent avancée comme un frein important au développement de cette ressource énergétique. Cependant, ce prix a environ  $3,5\text{€} \approx 4,5\text{\$/W}_c$ , baisse régulièrement avec les avancées technologiques diverses. L'objectif des professionnels est de passer dans quelques années, sous la barre symbolique de  $1\text{€/W}_c$ . Quelle que soit la baisse des coûts atteinte, cela rend cette énergie de plus en plus intéressante.

Si on se penche sur les diverses avancées technologiques effectuées ces dernières années, on voit apparaître dans la littérature quantités de matériaux différents ainsi que plusieurs assemblages possibles pour créer un GPV fiable. Pour l'utilisateur final, la nature technologique de la cellule utilisée pour produire de l'énergie importera donc peu en premier lieu. Les paramètres plus pertinents sont donc tout d'abord le prix du watt crête du module ( $\text{€/W}_c$ ), son rendement, sa durée de vie, sa taille, son poids, son apparence esthétique et l'impact de la fabrication et du retraitement sur l'environnement.

Ainsi, en fonction des applications visées, chaque critère sera plus ou moins modéré pour mieux sélectionner les meilleures combinaisons (système autonome hautement sécurisé, système de forte production pour la connexion réseau, production domestique, portables, etc. ...).

Du point de vue des chercheurs, une bonne compréhension des différentes technologies de cellule et de module est cruciale pour continuer à réduire les coûts, augmenter les performances et améliorer l'impact sur l'environnement en trouvant par exemple des solutions de recyclage dès la conception de nouveaux modules Photovoltaïque.

De nombreuses technologies sont aujourd'hui opérationnelles mais beaucoup exigent encore des travaux de recherche et de développement spécifiques pour atteindre le degré de maturité nécessaire à une forte production.

### *II.2.7 Les matériaux des cellules solaires PV*

L'énergie PV fait appel généralement à une des technologies suivantes :

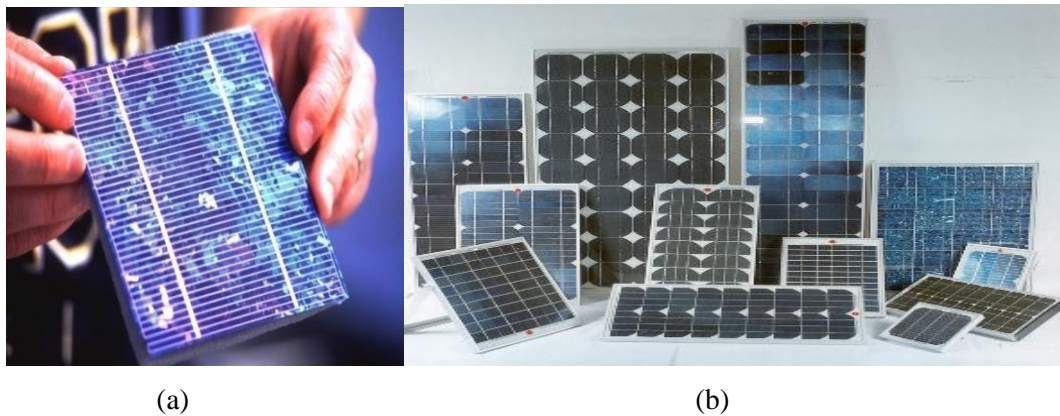
- La 1<sup>ère</sup> technologie PV recourt aux cellules de Silicium monocristallin (sc-Si) ou Silicium Polycristallin (pc-Si) ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 12 à 25 %. La durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans (voir figure II-7). Les (sc-Si) représentant environ 30,9 % du mar-

ché mondial ; parcontre Les (pc-Si) représentant environ 57 % du marché mondial car ces derniers peuvent supporter la chaleur (le coefficient de températures gardent le rendement élevé) ainsi qu'ils sont moins chère que les (sc-Si)

- La 2<sup>ème</sup> technologie fait appel aux cellules de Si amorphe (a-Si). L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans. Les (a-Si) représentant environ 3,4 % du marché mondial
- La 3<sup>ème</sup> technologie fait appel à d'autres matériaux SC, tels que le Tellure de Cadmium (CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs).

Les différents types de technologie sont représentés dans le tableau II.3 (d'après Total énergie (www.total-energie.fr) revue du 9 Juillet 2006).

La production mondiale de cellules solaires PV a été en 2008 6,9GW alors qu'en 2010 augmente à 24GW. D'autres technologies existent pour la fabrication des cellules solaires, très différentes de celles mentionnées ci-dessus. Citant le Dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) qui utilise un milieu aqueux pour produire l'effet photovoltaïque. Cellules à concentration à petites surfaces qui utilisent une loupe de type Fresnel, un miroir parabolique, etc...



**Figure II-7.** Photovoltaïque à base des cellules de silicium monocristallin ou Poly-cristallin (a) Cellule solaire ; (b) panneaux solaire

**Tableau II-3 :** Rendement énergétique des différents types de cellules PVs.

Type de cellule	Rendements des cellules (%)			Domaines d'application
	Théorique	en labo.	disponible	
Silicium Monocristallin	27	24.7	14-20	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	Modules de grandes dimensions : Toits et façades, générateurs de toutes tailles
Silicium Amorphe	25	13	6-8	Appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) Modules de grandes dimensions (intégration dans les bâtiments)
Arséniure de	29	27.5	18-20	Systèmes de concentrateur, espace

Gallium GaAs				(satellites).
Diséléniure de cuivre et d'indium CIS	27.5	18.2	10-12	Appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellurure de Gadmuim CdTe	28.5	16	9-11	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

### II.2.8 Fonctionnement d'un GPV à sa puissance maximale

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un Volt pour une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un panneau solaire, (Voir figures II.8, 9 et 8).

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La mise en série ou en parallèle des cellules solaires aboutit aux caractéristiques I(V), ainsi que l'influence de l'ombrage sur la caractéristique I(V) de groupement de cellules série ou parallèle, comme c'est illustré dans les figures II-7, et 8.

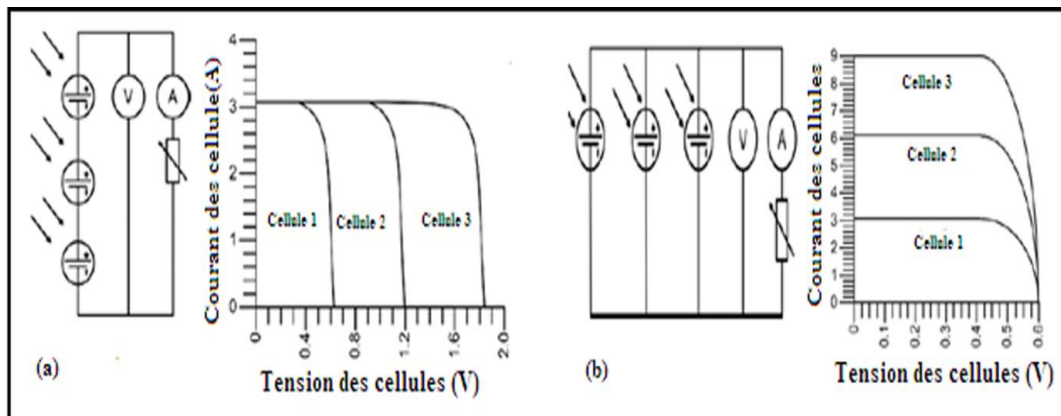


Figure II-8 Évaluation de la caractéristique I (V) avec des cellules ; (a) en séries, (b) en parallèles.

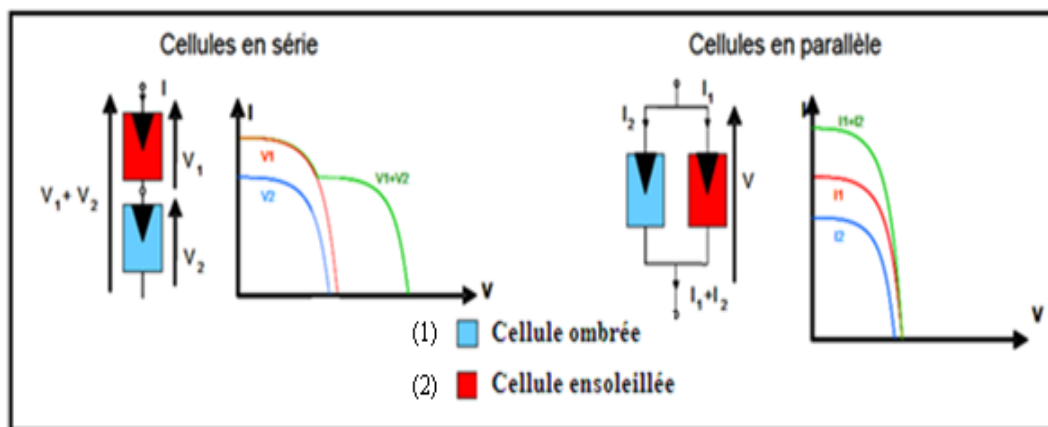


Figure II-9. Influence de l'ombrage sur la caractéristique de groupement des cellules séries/parallèles.

La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectées en série, comme l'illustre la figure II-10, Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules connectées en série.

Le nombre de cellules de chaque sous-réseau correspond à un compromis économique entre protection et perte d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel d'ombrage.

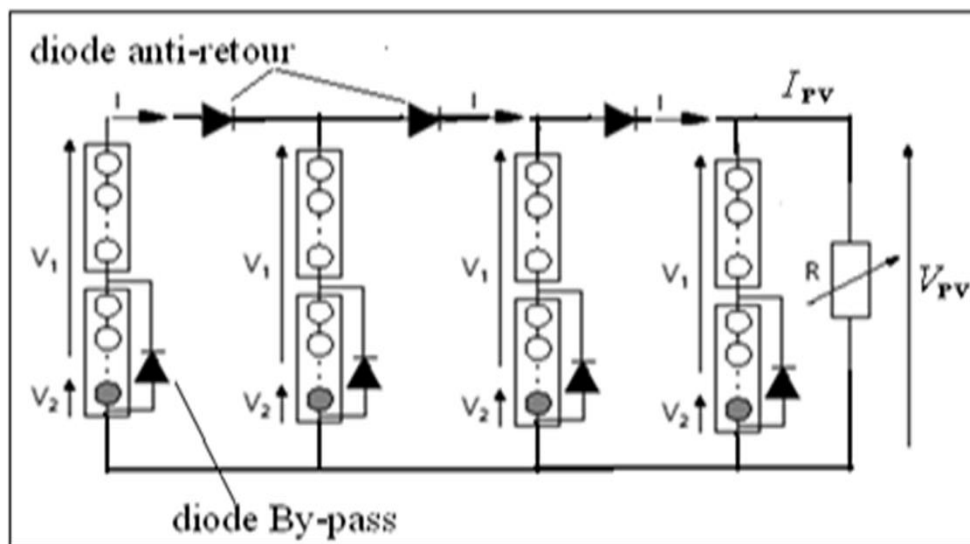
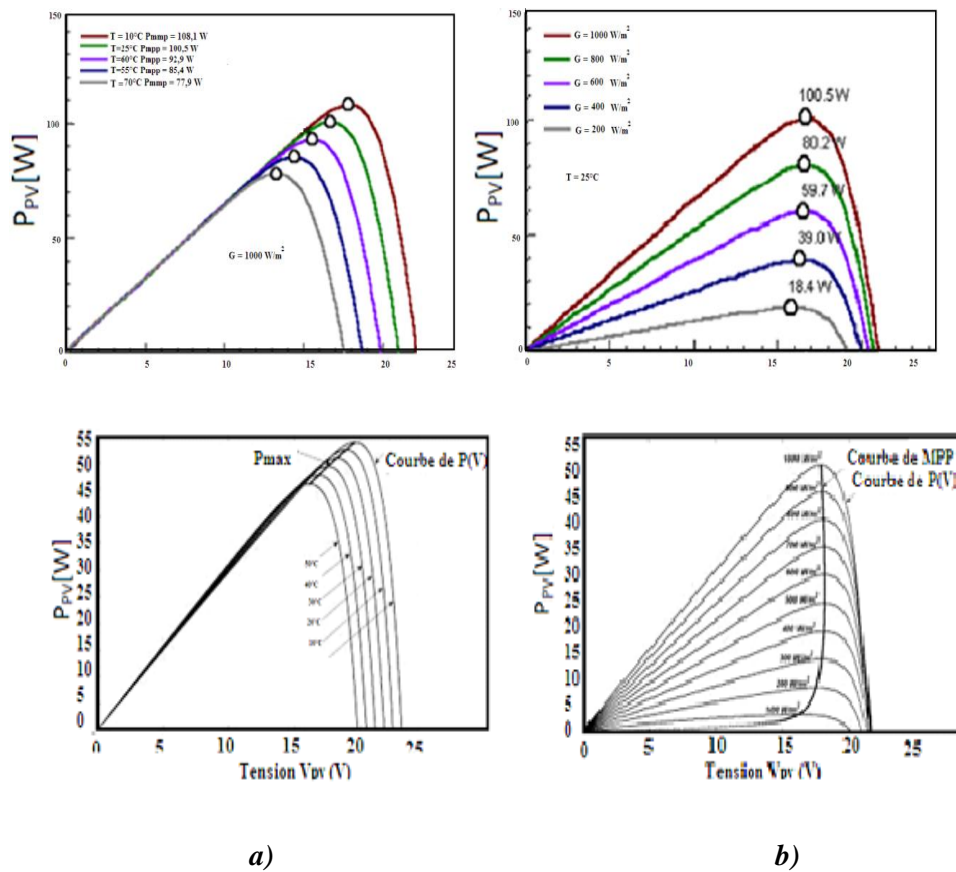


Figure II-10. Exemples d'association sécurisée de cellules PVs avec leurs diodes de protections.

La caractéristique électrique  $I(V)$  de ce type de GPV s'avère proche de celle d'une cellule PV aux rapports de proportionnalités près. Ces rapports dépendent du nombre de cellules connectées en série et du nombre de branches de cellules associées en parallèle. Cette caractéristique est également non linéaire et présente un

point de puissance maximal caractérisé par un courant et une tension nommés respectivement, comme pour la cellule,  $I_{OPT}$  et  $V_{OPT}$ .

Sur la figure II-11, nous pouvons observer l'évolution du PPM d'un module commercial typique de  $100W_c$  et  $50W_c$  constitué de 36 cellules monocristallines en série, en fonction de la température (a) et de l'éclairement (b) [4,11].



**Figure II-11.** Evolution du PPM d'un module PV monocristallin d'une puissance crête de 100W et 50W en fonction de la température (a) et de l'éclairement (b).

### II.2.9 Protections classiques d'un GPV

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles, (voir figure II.10) :

- La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, comme une batterie durant la nuit.
- Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du GPV, comme c'est illustré sur la figure II-12, par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

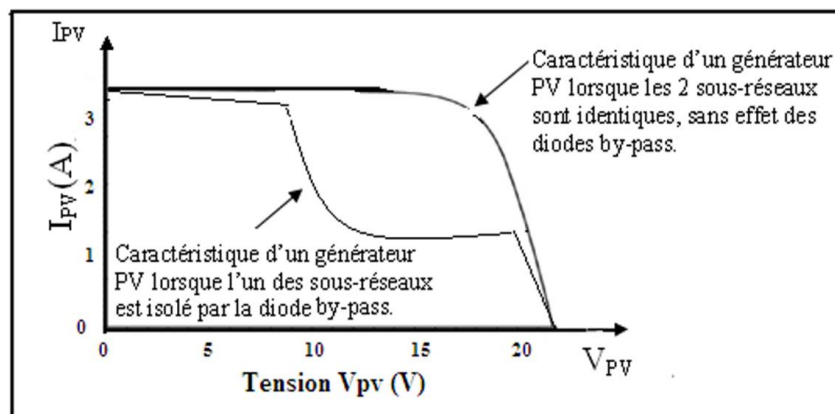


Figure II-11. Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V) d'un GPV

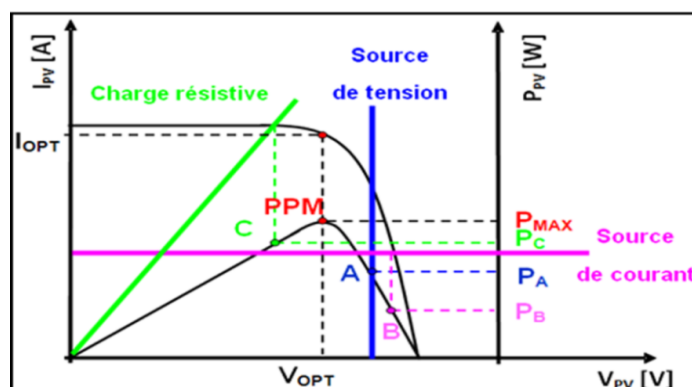
### II.2.10 Connexion directe entre le GPV et la charge.

Dans le cas d'une connexion directe, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté. Ce type d'application peut se résumer à un GPV ayant une tension  $V_{OPT}$  fixée par la tension nominale de l'application. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût de l'opération.

Néanmoins, cette configuration n'offre aucun type de limitation et/ou de réglage de la tension de la charge. Ce qui la restreint à des applications nécessitant une tension fixe ou faiblement variable. Par exemple, le cas de batteries de stockage dans les systèmes isolés. Cependant, un examen plus approfondi de ces applications montre que même dans ce cas, le transfert d'énergie électrique disponible aux bornes du GPV vers la charge



dépend fortement de l'état de la batterie ayant une tension à ses bornes variant d'un pourcentage non négligeable. Plus généralement, la puissance extraite d'un GPV connectée directement à une application est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV, voir la figure II-13.



**Figure II-13.** Points de fonctionnement d'un GPV

en connexion directe et en fonction de la charge, [15].

Un GPV peut être connecté directement à trois types de charges :

- Une charge de type source de tension continue ;
- Une charge de type source de courant continue ;
- Une charge purement résistive.

Trois points de fonctionnement A, B, C respectifs peuvent être identifiés fournissant une puissance  $P_A$ ,  $P_B$  et  $P_C$ . Ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la  $P_{max}$  potentielle, la différence étant perdue sous forme de chaleur dissipée dans le générateur.

D'autre part, certains types de charges ont besoin de tensions et courants alternatifs. La connexion directe n'est alors pas possible car le GPV fournit un courant continu. A travers ces exemples, on peut montrer rapidement les limites de la connexion directe autant sur les pertes de production qu'elle entraîne que sur les limites des applications compatibles (DC). Des recherches sur des solutions novatrices optimisant mieux la production d'énergie PV sont d'actualité et même nécessaires pour amener l'énergie PV à un degré de fiabilité comparable à une source d'énergie traditionnelle.

### II.2.11 Introduction d'un étage d'adaptation.

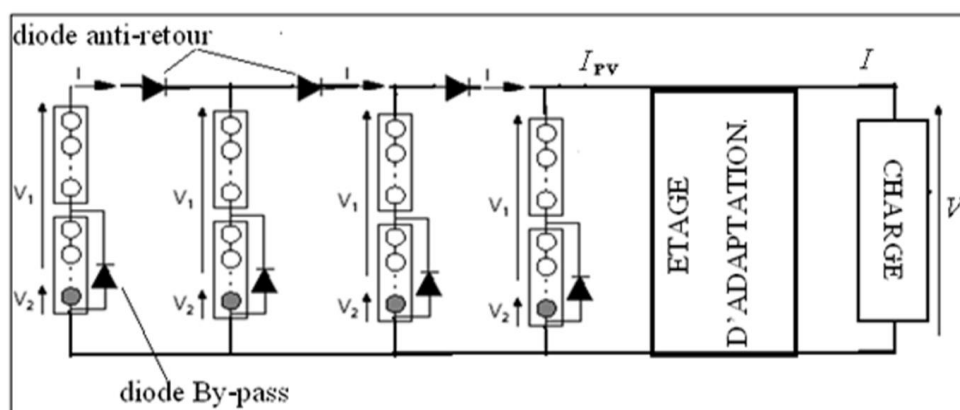
Le point de fonctionnement d'un GPV peut se trouver plus ou moins éloigné du PPM, voir ne pas exister. Ce dernier cas se produit par exemple, lorsqu'une batterie connectée à un GPV, présente une tension de batterie systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque ( $V_{oc}$ ). Alors,

aucun transfert de puissance ne peut avoir lieu. Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la figure II-14, est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source PV et la charge.

Pour cela, il suffit d'effectuer un choix sur l'étage d'adaptation selon ses propriétés de conversion de puissance et la présence d'au moins un degré de liberté lui permettant d'adapter les tensions et les courants autant en valeur qu'en forme entre son port d'entrée et son port de sortie pour respecter au mieux les contraintes d'une part du GPV et d'autre part, de la charge.

L'électronique de puissance largement utilisée dans divers domaines de la conversion d'énergie offre plusieurs solutions potentielles sous forme de convertisseurs statiques. En résumé, selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaitée, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs statiques (CS) et permet d'assurer les fonctions suivantes [15, 16]:

- Adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire (convertisseur Buck, Boost,...),
- Introduire une isolation galvanique (convertisseur Flyback, Forward,...),
- Connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative (Onduleur).



**Figure II-14.** Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

Lors d'une connexion à l'aide d'un étage d'adaptation, Il est à remarquer que les protections initiales de diodes by-pass et de diodes anti-retour sont également indispensables. L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale. L'ensemble peut fonctionner de façon idéale, si diverses boucles de contrôle en entrée et en sortie de l'étage d'adaptation sont prévues. En entrée, elles garantissent l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du GPV. Et en sortie, des boucles de contrôle spécifiques permettent un fonctionnement optimal de chaque application dans son mode le plus approprié. Les techniques utilisées classiquement pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage d'adaptation une

commande appelée Recherche du Point de Puissance Maximum (MPPT: Maximum Power Point Tracking) qui effectue une recherche permanente du PPM.

Cependant, en pratique, pour que l'étage d'adaptation joue le rôle d'interface idéale (sans pertes) entre les deux éléments, plusieurs conditions sont à respecter [15, 16] :

- le type d'action de contrôle sur le port d'entrée ne doit pas générer des pertes en régime statique ou transitoire ;
- le transfert de la puissance du GPV ne doit pas être minimisé par les diverses pertes liées au fonctionnement de l'étage d'adaptation. [17].

#### 1.7.4. Dimensionnement et protection de l'onduleur

Un onduleur est caractérisé par une tension d'entrée maximale admissible  $U_{max}$  (ou  $P_{max}$ ). La tension délivrée par le GPV ne devra donc jamais dépasser  $U_{max}$ . Le nombre maximum de modules PV en série se calcule par la formule suivante :

$$N_s = \frac{U_{max}}{1,15 \cdot V_{CO}} \quad (II.6)$$

#### 1.7.5. Dimensionnement et protection du MPPT

L'onduleur doit à tout moment demander au GPV leur  $P_{max}$ . Le point de fonctionnement correspond au PPM varie en permanence en f (G,T,...).

Le MPPT fonctionne pour une plage de tension d'entrée d'onduleur définie par le fabricant.

$$N_s = \frac{U_{MPPT,max}}{1,15 \cdot U_{MPP}} \quad (II.7)$$

RM: Technologie récente, (MPPT+H+Ond ) intégrés

#### 1.7.6. Dimensionnement du GPV :

La puissance de sortie d'un GPV en prenant en considération le rendement moyen journalier du GPV dans les conditions d'exploitation est :

$$P_{GPV,Max} = N_T \cdot P_{c,PV} = \eta_{GPV} \cdot N_T \cdot G \cdot A_{eff} \quad (II.8)$$

$$\text{et } N_T = N_s \cdot N_p \quad (II.9)$$

$N_T$  : nombre totale des panneaux solaire ;  $N_s$  : nombre des panneaux solaires en série

$N_p$  : nombre des panneaux solaires en paralleles

### II.3 Energie Solaire Thermique

C'est une énergie renouvelable, propre et inépuisable apportée par le rayonnement solaire, et exploitée pour produire de l'électricité ou de la chaleur de plusieurs façons: éclairage et chauffage "passif" des logements par le soleil. L'énergie solaire est récupérée pour fournir de la chaleur pour la production d'eau chaude, ou la climatisation, (voir figure II-15).

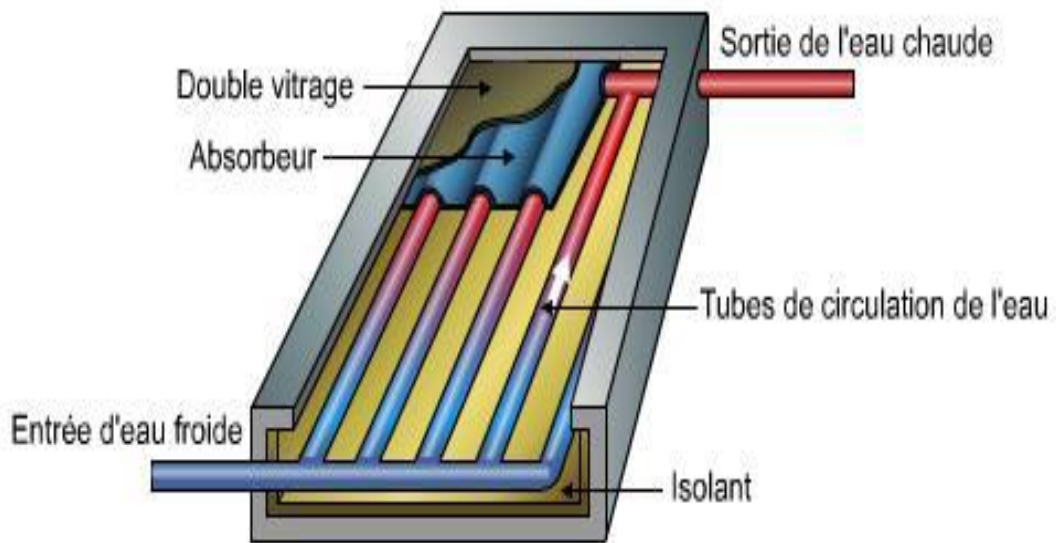


Figure II-15. Principe du Chauffe- eau solaire

Il existe deux principales technologies des capteurs solaires thermiques, Capteurs passifs (Murs Trombe, Murs «solaires») et Capteurs actifs (plans, sous vide (voir figures II-16)).



(a) Plan



(b) à tubes sous vide

Figure II-16 Technologies des capteurs solaires thermiques

#### II.3.1 Principe d'un panneau solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire

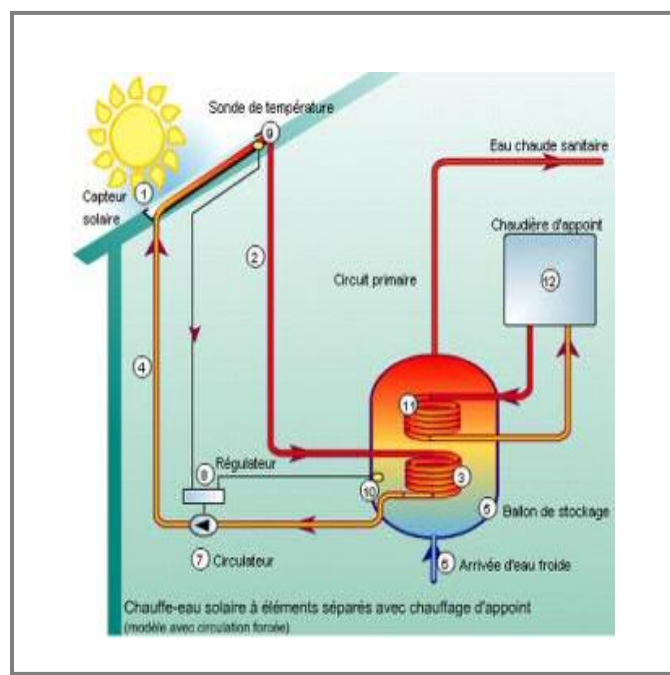
L'utilisation de système thermique solaire a commencé en 1993, actuellement un grand nombre sont appliqué avec un taux de croissance annuelle de 15% / an, [18]:

- ☼ L'application la plus courante: le chauffe-eau solaire (des hôtels, des hôpitaux,...) ;
- ☼ le chauffage, soit par l'eau soit par l'air (solution la moins chère):
- ☼ le chauffage des piscines ;
- ☼ le refroidissement de l'air ou de système remplaçant le chauffage ;

Le dessalement de l'eau de mer dans les endroits où l'eau potable est rare ;

- ☼ Un corps «noir» est exposé face au soleil, protégé des pertes à l'arrière par un isolant, et bénéficie de l'effet de serre du vitrage ;
- ☼ Un fluide (eau + antigel) le traverse pour collecter les calories ;
- ☼ Il peut être intégré en toiture ou posé sur des supports métalliques ;
- ☼ Rendement fonction de la température 80 %.

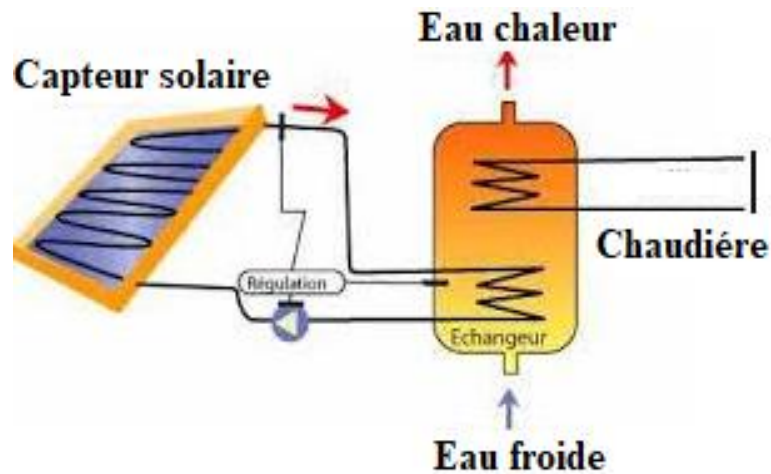
*II.3.2 Exemple des Performances d'un Capteur (voir l'exemple dans la figure II-17):*



*Figure II-17: Exemple des Performances d'un Capteur*

- ☼ Dimensions : 1,87m x 1,15m x 0,095m
- ☼ Poids = 34,0kg ;
- ☼ Surface totale = 2,15m<sup>2</sup> ;

- ⊗ Absorbeur, hautement sélectif = surface hautes performances de 2,0m<sup>2</sup> ;
- ⊗ Vitrage renforcé = verre à haute transmission et faible réflexion ;
- ⊗ Isolation minérale résistante aux hautes températures = laine de roche 50mm ;
- ⊗ Cadre aluminium résistant = aux intempéries et à l'eau de mer avec joint d'étanchéité.



*Figure II-17. Exemple d'une installation d'un Capteur thermique*

### **Dimensionnements d'un système solaire thermiques**

Pour dimensionner une installation solaire de production d'eau chaude sanitaire (ECS) est d'estimer les besoins en eau chaude solaire, ensuite les autres facteurs tels que le climat, l'orientation et l'inclinaison des capteurs.

Nous allons détailler une méthode de dimensionnement qui prend en compte divers paramètres. Le but étant d'aboutir finalement à une proposition de panneaux **solaire thermiques** la plus efficace et la plus rentable pour notre cas.

*Calcul du volume du ballon de stockage :*

$$V_{st,} = 2 \times V_p \times P \times (T_{ec} - T_{ef}) / T_{st} - T_{ef}$$

$V_{st,}$ : Volume minimal du ballon de stockage en litre.

2 : Coefficient de sécurité pour garantir la couverture des besoins.

$V_p$  : Consommation journalière par personne en litres.

$P$  : Nombre de personnes.

$T_{ec}$ : Température souhaitée de l'eau chaude sanitaire en °C.

$T_{ef}$ : Température de l'eau froide en °C.

$T_{st}$ : Température de stockage de l'eau dans le ballon.

***Calcul de l'énergie calorifique journalière nécessaire au chauffage de l'eau :***

Pour calculer la quantité d'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire, il faut d'abord connaître le volume d'eau à produire. La quantité réelle d'énergie nécessaire pour produire l'eau chaude sanitaire est calculée comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer ce volume d'eau de la température de l'eau froide jusqu'à la température demandée cette énergie est donnée par [32] :

$$E_j = V \times C_p \times \rho \times (T_{st} - T_{ef})$$

$E_j$  : Energie calorifique journalière nécessaire.

$V$ : Volume du ballon de stockage.

$C_p$ : Capacité calorifique de l'eau (1.167Wh/kg/°C).

$\rho$ : Masse volumique d'eau (1kg/l).

$T_{st}$  et  $T_{ef}$  Sont toujours respectivement les températures de stockage et de l'eau froide.

***Calcul de la surface et le nombre de panneaux thermique :***

La surface de panneau nécessaire à notre installation, se définit comme étant le rapport entre l'énergie utile au chauffage de l'eau à la température suitée °C (notée  $E_j$ ) et le gisement solaire.

***Calcul de la surface totale des panneaux thermique:***

$$S_{tot} = E_j / G_j$$

$G_j$  : Le gisement solaire

***Calcul du nombre de panneaux thermique:***

$$N_{p.th} = S_{tot} / S_u$$

$S_u$ : Surface unitaire d'un panneau solaire thermique.

*Application numérique de la méthode de dimensionnement (cas d'étude) :*

*Calcul du volume du ballon de stockage :*

$$V_{st,min} = 2 \times V_p \times P \times (T_{ec} - T_{ef}) / (T_{st} - T_{ef})$$

$V_p$  : Consommation journalière par personne en litres. A cuire et éviers 45 litres

$$V_{st} = 2 \times 45 \times 4 \times (46 - 8) / (56 - 8) = 285 \text{ L}$$

On recommandera dans ce cas un ballon de 300 litres de capacité.

*Calcul de l'énergie calorifique journalière nécessaire au chauffage de l'eau :*

$$E_j = V \times C_p \times \rho \times (T_{st} - T_{ef})$$

$$E_j = 300 \times 1.16 \times (56 - 8) = 16.704 \text{ kwh/jour}$$

*Calcul de la surface et le nombre de panneaux thermique :*

*Calcul de la surface totale des panneaux :*

$$S_{tot} = E_j / G_j$$

$G_j$  : Le gisement solaire est 5 kwh / jour

$$S_{tot} = 16704 / 5000 = 3.341 \text{ m}^2$$

*Calcul du nombre de panneaux solaires thermiques :*

$$N_{p.th} = S_{tot} / S_u$$

$S_u$ : Surface unitaire d'un panneau solaire thermique.

On prend capteur k720-TS-D15 d'une surface de 1.95m<sup>2</sup>

$$N_{p.th} = 2.1344 / 1.95 = 1.09$$

On prend nombre de panneaux,  $N_{p.th} = 2$  panneaux solaires thermiques

*Exemple des équipements d'installation :*

En général une installation solaire thermique se compose de différentes parties :

- Le récepteur d'énergie (les capteurs solaires de type k720-TS-D15)
- Ballon 300 EM .



- Certaines pièces indispensables qui composent une installation solaire : connexion hydraulique ballon/capteur, groupe de sécurité.

### Exercice 1 : Chauffe-eau solaire

Les panneaux solaires thermiques comportent des tubes noirs dans lesquels circule un fluide chauffé par le Soleil. Ce fluide transmet sa chaleur à l'eau d'un réservoir qui constitue le chauffe-eau.

1°) Représenter la chaîne énergétique de conversion de l'énergie des panneaux.

2°) Un panneau solaire reçoit une énergie  $E_S = 3,0 \text{ kWh}$  tandis que le fluide reçoit  $E_{th} = 2,5 \text{ kWh}$ . Calculer le rendement  $r$  du panneau.

3°) Le fluide transmet l'énergie  $E_{th}$  à l'eau du chauffe-eau avec un rendement  $r' = 80\%$ .

Calculer l'énergie  $E_{eau}$  reçue par l'eau.

4°) Le chauffe-eau contient 300 L d'eau initialement à la température  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ . Exprimer puis calculer la température finale de l'eau  $\theta_f$  après qu'elle ait reçue l'énergie  $E_{eau}$ .

5°) Quelle énergie  $E'_{eau}$  (en kWh) devrait recevoir l'eau du chauffe-eau pour que sa température atteigne  $60^\circ\text{C}$  (en partant toujours de  $20^\circ\text{C}$ ) ?

#### Données et formulaire :

$\Delta E = m \cdot c \cdot (\theta_f - \theta_i)$  ; capacité calorifique massique de l'eau :  $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  ;

Masse volumique de l'eau :  $1000 \text{ kg/m}^3$  ;  $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$ .

### Exercice 2 : Pour refroidir un verre d'eau

On dispose d'un verre contenant 150 mL d'eau à la température de  $20,0^\circ\text{C}$ .

1<sup>er</sup> cas :

On plonge dans le verre d'eau un glaçon de masse 3,0 g à la température de  $0,0^\circ\text{C}$  et on attend que la température se stabilise. La température finale est  $18,0^\circ\text{C}$ .

2<sup>ème</sup> cas :

On plonge dans le verre d'eau une masse d'eau liquide de 3,0 g et on attend que la température se stabilise. La température finale est de  $19,6^\circ\text{C}$ .

1°) Pourquoi un cube de glace à  $0^\circ\text{C}$  est-il plus efficace pour refroidir une boisson que la même masse d'eau liquide prise à  $0^\circ\text{C}$  ? Aucun calcul n'est demandé.

2°) Dans le 1<sup>er</sup> cas, en supposant que toute l'énergie de fusion  $\Delta E_g$  du glaçon est reçue de l'eau du verre sans pertes, quelle serait la température finale  $\theta_f$  du mélange avec un glaçon de masse  $m_g = 6,0 \text{ g}$  ? Un calcul détaillé est demandé ! L'expression littérale de  $\theta_f$  donne 1 point.

Données :

Capacité thermique massique de l'eau (liquide) :  $c_e = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  ; Energie de fusion de la glace d'eau :  $\Delta E_f = 333 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$  ;  $\Delta E_g = m_g \cdot \Delta E_f$  ;  $\Delta E_e = m_e \cdot c_e \cdot (\theta_f - \theta_i)$ .

### Exercice 3 : Une plaque chauffante

Une plaque chauffante fournissant une énergie de 1000 J par seconde est utilisée pour chauffer de l'eau. La plaque est chauffée par la combustion d'hexane de formule brute  $C_6H_{14}$ .

1°) Ecrire l'équation bilan de la combustion de l'hexane dans le dioxygène de l'air. 2°) Quelle énergie  $\Delta E(\text{eau})$  faut-il transférer à une masse  $m(\text{eau}) = 2,0 \text{ kg}$  pour faire passer sa température de  $20^\circ\text{C}$  à  $80^\circ\text{C}$  ? En déduire la durée du chauffage  $\Delta t$  correspondante.

3°) Déduire de la question précédente l'énergie  $\Delta E$  fournie par la plaque chauffante (en supposant qu'il n'y a pas de pertes thermiques lors du chauffage) puis la quantité de matière  $n$  d'hexane nécessaire.

4°) Quelle masse de dioxyde de carbone dégage la combustion de la quantité de matière  $n$  d'hexane précédente ?

5°) Si on utilisait du butane d'énergie de combustion égale à  $8,51.10^8 \text{ J/mol}$  en consommerait-on plus ou moins de hexane pour la même durée de chauffage ? Justifier.

6°) Sur le plan environnemental, quel serait l'avantage d'utiliser une plaque chauffante électrique à la place de celle de l'exercice ?

#### Données :

capacité thermique massique de l'eau :  $c(\text{eau}) = 4,18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

$M(C_6H_{14}) = 86 \text{ g/mol}$  ;  $M(H_2O) = 18 \text{ g/mol}$  ;  $M(O_2) = 32 \text{ g/mol}$  ;  $M(CO_2) = 44 \text{ g/mol}$   $\rho(\text{eau}) = 1000 \text{ kg/m}^3$  ;

Energie de combustion de l'hexane :

$$\Delta E_{\text{comb}} = 4,16.10^7 \text{ J/mol.}$$

$$\Delta E = m.c.(\theta_f - \theta_i) ; n = m/M.$$

## Chapitre-III

## Energie Eolienne

### *III . Introduction*

L'énergie éolienne (du mot grec Eole, le Dieu du vent) c'est une source d'énergie qui dépend du vent, dont la force motrice (énergie cinétique) est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent, en une énergie diversement utilisable.

Donc, Une éolienne est une machine permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de type éolienne. Cette énergie mécanique éolienne a été utilisée au cours des âges pour pomper l'eau ou moudre le grain. Elle est une source d'énergie renouvelable intermittente selon les conditions météorologiques, qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Elle nécessite donc des installations de production ou de stockage en remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité. Celles-ci peuvent être prévues avec une assez bonne précision, [19-21].

La part de l'éolien dans la production mondiale d'électricité atteignait 4,8 % en 2018 et est estimée à 5,3 % en 2019. Les principaux pays producteurs sont la Chine (28,4 % du total mondial en 2019), les États-Unis (21,2 %) et l'Allemagne (8,8 %) [21]. Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité de type éolienne qui est consommée localement (sites isolés), ou injectée sur le réseau électrique (éoliennes connectées au réseau). L'application « connecté réseau » ou « grand éolien » représente, en terme de puissance installée, la quasi-totalité du marché éolien :

La production mondiale d'électricité atteignait 4,8 % en 2018 et est estimée à 5,3 % en 2019. Les principaux pays producteurs sont la Chine (28,4 % du total mondial en 2019), les États-Unis (21,2 %) et l'Allemagne (8,8 %) [21].

Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité de type éolienne qui est consommée localement (sites isolés), ou injectée sur le réseau électrique (éoliennes connectées au réseau). L'application « connecté réseau » ou « grand éolien » représente, en terme de puissance installée, la quasi-totalité du marché éolien :

### III.1 Les trois manières d'utilisation de la source d'énergie éolienne

- avec conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- transformée en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...) : par exemple dans les moulins de Majorque, pour irriguer les champs, ou pour abreuver le bétail ;
- en production d'énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou fonctionne au sein d'un système plus autonome grâce à un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage de l'énergie, [19].

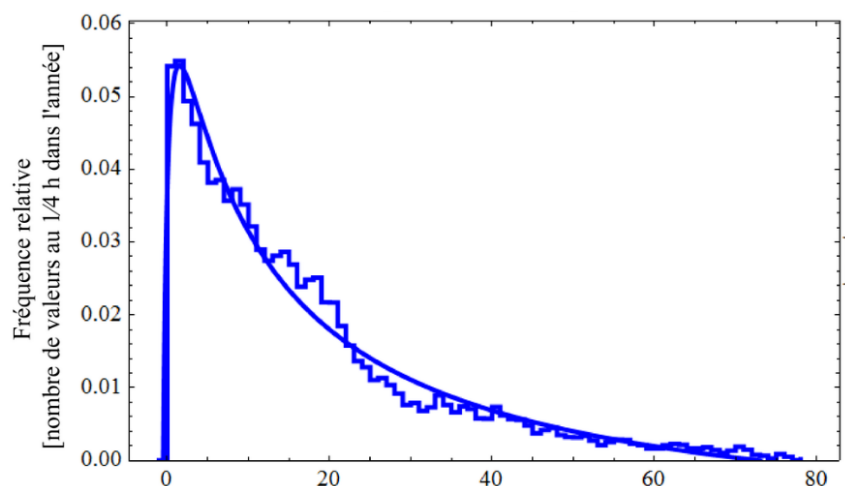
### III.2 Variabilité de la production éolienne

La production éolienne dépendant directement de la force du vent, elle est très fluctuante (on dit aussi intermittente ou volatile) : le graphique ci-contre montre la distribution de probabilité de la production éolienne en Allemagne [en abscisse : production éolienne en % de la charge maximale du réseau ; en ordonnée : fréquence relative (nombre de valeurs au  $\frac{1}{4}$  h dans l'année)] : on note la concentration des fréquences sur les faibles valeurs de production. RTE publie un graphique similaire dans son rapport sur le Bilan électrique 2012 [19, 20].

Selon l'association VGB, et à titre d'exemple, on décompte sur la période 2010-2016 en Allemagne 160 épisodes de cinq jours consécutifs de production éolienne inférieure à 5 GW (la puissance installée du parc éolien était de 26 903 MW en 2010 et de 50 019 MW en 2016), et chaque année a connu des épisodes de vent faible de 10 à 14 jours consécutifs.

Une étude de la société Energy Brainpool pour le compte de Greenpeace confirme :

- Sur la période 2006-2016, elle identifie tous les deux ans au moins un épisode de deux semaines de vent faible, dans la figure III-1, on présente un exemple de la production éolienne en % de la charge maximale du réseau, [20].



**Figure III-1.** Exemple de distribution de probabilité de la production éolienne. [20]

### III.3 Composition d'une Éolienne

#### A. Ailes ou pales d'une éolienne

Les éoliennes modernes sont composées de 2 à 3 ailes, tournant autour d'un rotor à axe horizontal. Les pales de l'hélice d'une éolienne peuvent être en bois lamellé-collé, en plastique renforcé de fibre de verre, ou en métal... Le diamètre qu'elles balaient varie de 40 m à 120 m.

#### B. La tour ou le mât d'une éolienne

L'hélice de l'éolienne est située en haut d'une tour de 50 m à 110 m. le mât peut être des assemblages de croisillons métalliques, en béton ou en métal.

#### C. La partie électrique d'une éolienne

Dans les éoliennes destinées à produire de l'électricité, l'hélice fait tourner un générateur électrique situé en haut de la tour, dans le prolongement de l'axe de l'hélice de l'éolienne. Entre l'hélice et le générateur électrique de l'éolienne se trouve en général un multiplicateur de vitesse, car l'hélice de l'éolienne tourne à des vitesses d'environ 100 à 650 t/m alors qu'un générateur électrique doit être entraîné à environ 1500 à 3000 t/m, voir figure III-2, [19-21].

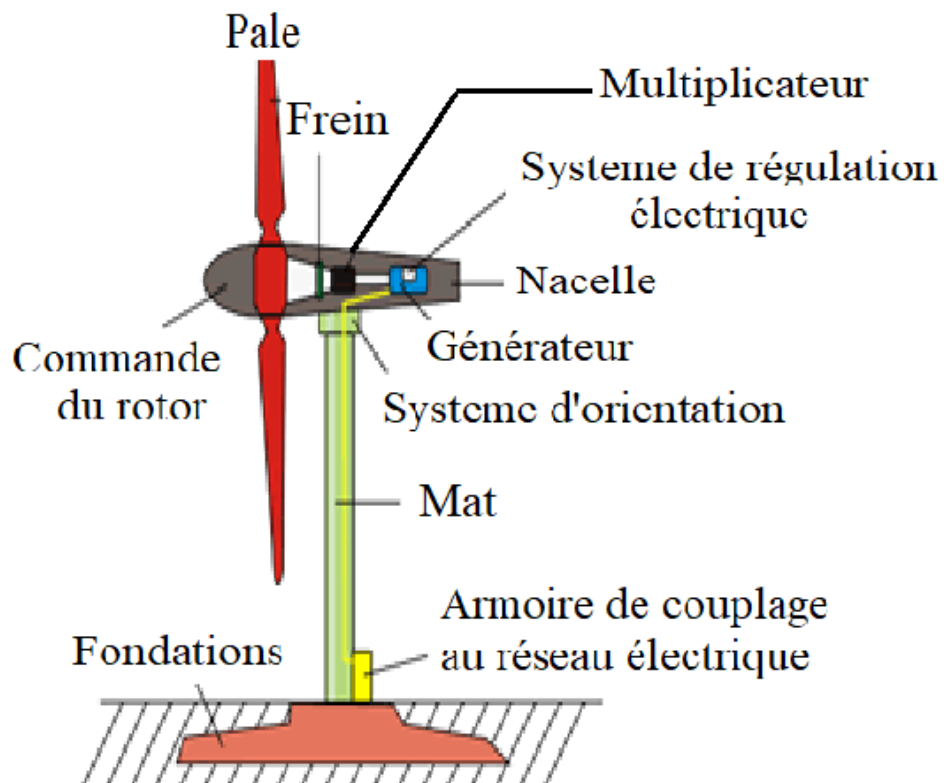


Figure III-2. Composition d'une éolienne, [21]

### III.4 Principe de fonctionnement d'une Éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple: le vent fait tourner des pales qui sont-elles même tourné le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne.

### III.5. Connaître la puissance d'une éolienne

L'éolienne permet d'installer le plus de puissance en un minimum de mètres carrés. Néanmoins, plusieurs modèles existent sur le marché et la puissance d'une éolienne dépend de plusieurs facteurs qui détermineront la puissance électrique produite et réinjectée sur le réseau. La puissance d'une éolienne s'évalue au regard de la puissance d'un aérogénérateur, élément central de production d'énergie. Elle s'exprimera en watts ou en kilowatts.

Les éléments les plus impactants pour déterminer la puissance d'une éolienne sont.

- Le diamètre du rotor, en sachant que le rotor est l'hélice ou la partie tournante de l'éolienne. Par ailleurs, le nombre de pâles ainsi que la forme de ces dernières auront un impact important sur la puissance

de l'éolienne. En effet, plus les pâles sont capables de se mettre en mouvement à l'aide du vent, plus la puissance transmise à l'aérogénérateur sera importante.

- La masse de l'air
- La force et la vitesse du vent
- Le rendement mécanique du transfert de l'hélice vers l'aérogénérateur
- Le rendement électrique du générateur électrique

Le calcul de la puissance d'une éolienne se retrouve à partir de la formule suivante :

$$P = 1/2 * \rho * S * v^3 \quad (III-1)$$

Dans laquelle P : représente la puissance en watt,

$\rho$  : représente la masse volumique ou le poids de l'air,

S : représente la surface du cercle de rayon égal à la longueur d'une pale

v : représente la vitesse du vent en mètre par seconde.

À partir de cette puissance nominale maximale, le rendement d'une éolienne dépendra des conditions extérieures comme la force du vent. Ce rendement sera ensuite exprimé en kWh. Cette unité du kWh exprimera l'énergie effectivement produite et consommable. Il sera ensuite possible de comparer la production en kWh avec la consommation d'une habitation, d'un bureau ou d'une usine qui sera également exprimée dans cette unité de mesure.

### III-6 La puissance disponible dépend du facteur de puissance $C_p$ de la machine

$$P_{dispo} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_e^3 \quad \Rightarrow \quad C_p \quad \Rightarrow \quad P_{elec} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot S \cdot V_e^3$$

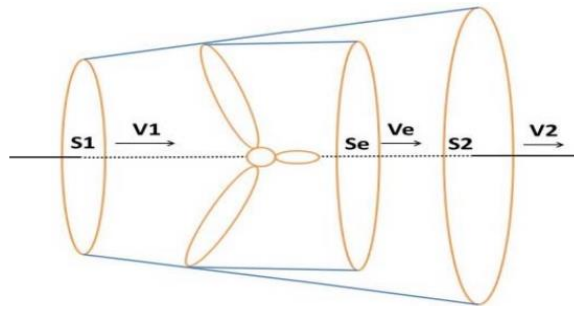
*Puissance en entrée de l'aérogénérateur*
**Coefficient de performance (0.4 pour les éoliennes actuelles)**
*Puissance en sortie de génératrice*

(III-2)

### III-7 La puissance électrique maximale

#### La puissance a une limite, celle de Betz ( $P_{max}$ théorique)

Si l'on suppose que l'air est incompressible, ce qui permet d'écrire la conservation du débit volumique  $S_1 V_1 = S_2 V_2 = S_e V_e$ , le théorème d'Euler, qui traite de la variation de la quantité de mouvement de la veine de vent entre l'amont ( $S_1, V_1$ ) et l'aval ( $S_2, V_2$ ) de l'hélice, permet d'écrire la force  $F$  s'exerçant sur les pales de l'aéromoteur sous la forme :



$$F = \rho \cdot S \cdot V_e (V_1 - V_2) \quad (\text{III-3})$$

Déduire la puissance disponible  $P_{dispo1}$  fournie par l'aéromoteur en fonction de  $\rho$ ,  $S$ ,  $V_e$ ,  $V_1$  et  $V_2$  ?

$$P_{dispo1} = \rho \cdot S \cdot V_e^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{III-4})$$

Quelle est la variation de l'énergie cinétique  $\Delta E_c$  de la masse  $m_a$  lorsque la vitesse passe de la valeur  $V_1$  à la valeur  $V_2$  ? En déduire une nouvelle expression de la puissance disponible  $P_{dispo2}$  en fonction de la masse volumique de l'air  $\rho$ , de la surface  $S$ , de la vitesse du vent  $V_e$ , et des vitesses  $V_1$  et  $V_2$ .

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m_a (V_1^2 - V_2^2) \quad P_{dispo2} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_e \cdot (V_2^2 - V_1^2) \quad (\text{III-5})$$

En déduire l'expression de la puissance disponible  $P_{dispo}$  en fonction de  $\rho$ ,  $S$ ,  $V_1$  et  $V_2$ .

$$P_{dispo} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{III-6})$$

En déduire des deux expressions  $P_{dispo1}$  et  $P_{dispo2}$  la relation reliant les trois vitesses  $V_e$ ,  $V_1$  et  $V_2$ .

$$P_{dispo1} = P_{dispo2} \Rightarrow V_e = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{III-7})$$

Déterminer la relation entre  $V_1$  et  $V_2$  définissant la puissance maximale  $P_{dispo\_max}$ . En déduire que la puissance maximale  $P_{dispo\_max}$  peut se mettre sous la forme suivante pour laquelle on déterminera le coefficient A.

$$\frac{dP_{dispo}}{dV_2} = 0 \Rightarrow V_1 = 3V_2 \quad P_{dispo\_max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3$$

En déduire la valeur maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ .

$$P_{dispo\_max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 = C_{pmax} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_e^3 \Rightarrow C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0.59 \quad (\text{III-8})$$

**Au maximum, 59% de la puissance reçue sera disponible**



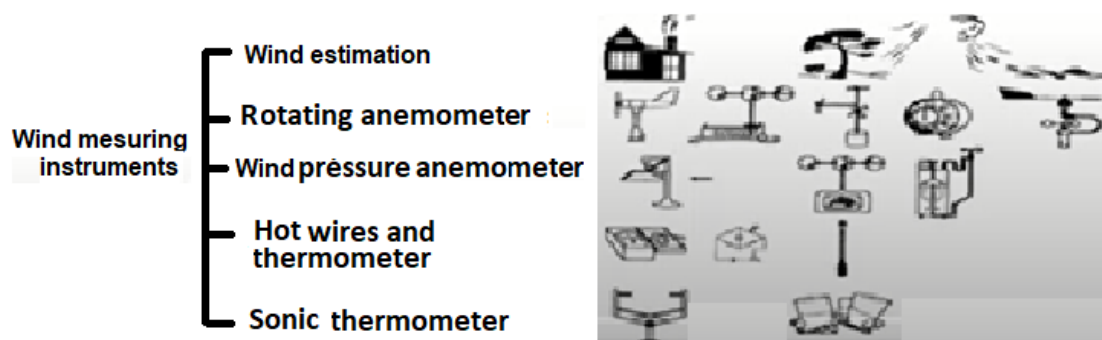
### III-7. Estimation de la production d'une éolienne

- ❖ La notion de potentiel éolien désigne la quantité théorique d'énergie éolienne disponible sur un territoire (terrestre ou marin) donné. Il est lié à la force et surtout à la régularité des vents qui ne doivent être ni trop fort ni trop faibles.
- ❖ Afin d'estimer le potentiel de production annuelle d'une éolienne dans un site donné, quatre principales étapes sont nécessaires

#### Etape.1: Mesure de la vitesse du vent pour une durée d'au moins 12 mois

Pour mener la campagne de mesure. On dispose de plusieurs types d'outils:

- Les mâts de mesure équipés de girouettes d'anémomètres, de thermomètre et/ou de baromètre et/ou d'hygromètre, etc.:
- Les sodars, qui sont des radars à effet Doppler sur les longueurs d'ondes sonores ;
- Les lidars, qui sont des radars à effet Doppler sur la longueur d'onde de la lumière (lazer).
- Les méthodes de modélisation numérique (voir figures II-6)

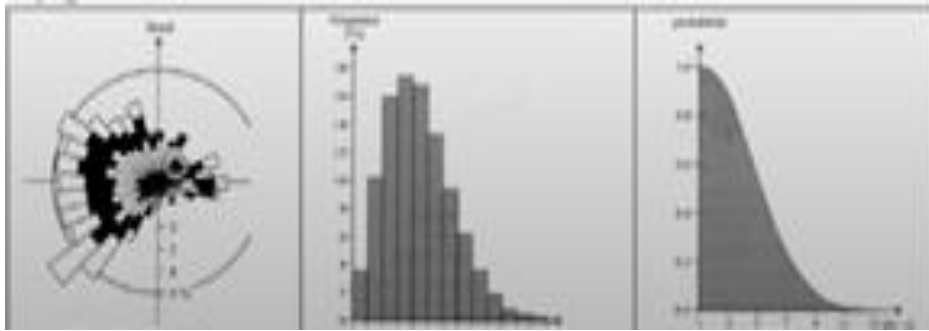


Figures II-6: Méthode de modélisation numérique

#### Etape 2 : Analyse des caractéristiques du vent

Pour caractériser le vent, il s'agit de connaître:

- Son profil directionnel, c.-à-d. les tendances probabilistes de la direction du vent (rose du vent)
- Son profil de vitesse, c.-à-d. les tendances probabilistes de la vitesse ainsi que sa répartition, la vitesse la plus fréquente, les vitesses extrêmes et les vitesses de rafale etc.
- Ses variations annuelles mensuelles et journalières
- Son profil énergétique, qui dépend de tous les points décrits ci-dessus, de la hauteur par rapport au sol du relief environnant et des autres données climatiques (température, pression, atmosphérique, hygrométrie).



Analyse de la répartition du vent du site

**Etape 3 : Modélisation de la densité de probabilité d'occurrence des vitesses de vent**

IL est d'usage d'exprimer la distribution des vitesses de vent à l'aide de la loi de Weibull:

$$f(V) = \left(\frac{k}{V}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{A}\right)^k}$$

Avec:  $f(v)$  : La fréquence d'occurrence (pourcentage du temps d'analyse rapporté à l'année) de la vitesse  $v$ : vitesse moyennée sur 10 minutes

A: Facteur d'échelle (proche de la vitesse moyenne annuelle du vent)

k: Paramétré de répartition représentatif de la turbulence de site,  $k= 2 \rightarrow$  Courbe de Payleigh



Courbe de Payleigh

**Etape 4 Dédire le potentiel énergétique:**

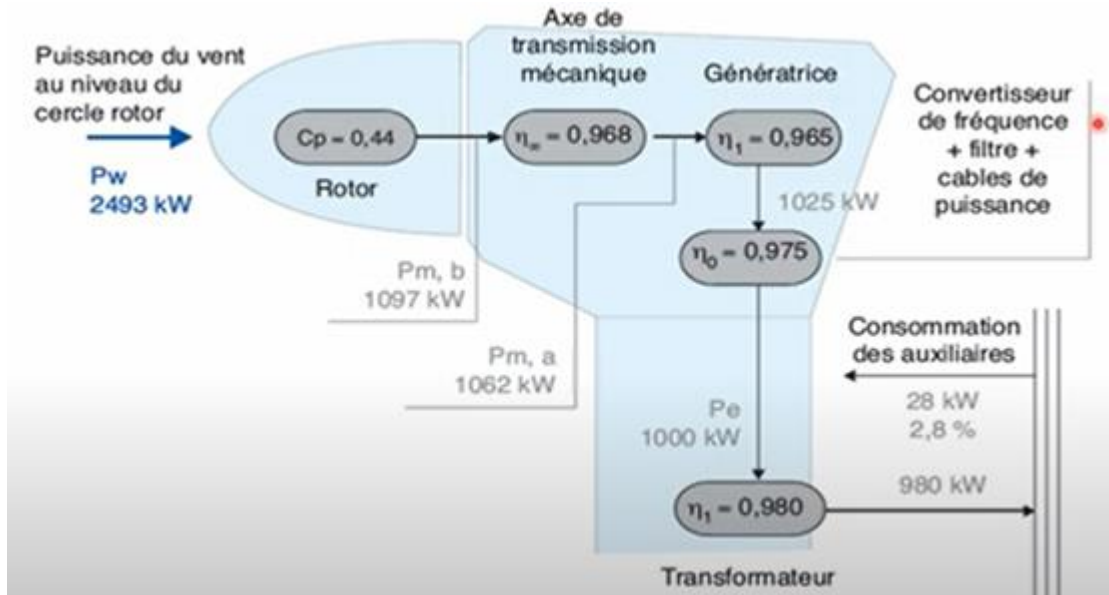
Pour déterminer l'énergie  $E$  que peut capturer la turbine pendant une période  $T$ , on peut simplement multiplier la puissance de l'aérogénérateur donnée par le constructeur  $P(V)$  par  $f(V) \times T$  :

$$E = T \int_{V_t}^{V_o} P(V) \times f(V) dV$$

Avec  $V_i$  est la vitesse de démarrage de l'éolienne ( $\sim 4\text{m/s}$ ) et  $V_o$  est la vitesse maximale du vent autorisée ( $\sim 25\text{m/s}$ ).

En pratique  $T = 8760\text{h}$  pour une année et l'intégrale est résolue numériquement.

Ordres de grandeur des rendements des systèmes internes d'une éolienne



Réseau électrique

### III-8 Exemple de calcul de l'énergie mécanique récupérée d'un cas concret d'une éolienne

Diamètre du rotor: 77m avec 3 pâles;

Vitesse de rotation du rotor : 9,6 à 17,3 tr/min ; Vitesse de vent de démarrage: 3m/s

Puissance maximale : 1500 kW pour un vent de 13 m/s ;

Poid: 3400 kg (sans la tour) ; Hauteur de la ttour : 80m/s

Vitesse du Vent (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Puissance $P_{recup}$ (kW)	44.9	133.5	248.9	408.2	612.4	871.9	1132.1	1359.6	1503.8	1528.2
% du temps	9	8	8	7	7	6	6	6	4	4
Temps/an (h)	788	701	701	613	613	525	525	525	350	350
Energie $E_{recup}$ (MW.h)	35.38	93.58	174.48	251.86	375.40	457.75	594.35	713.79	526.33	534.87

### III.9 Méthodes de dimensionnement et Méthodologie à suivre

Le dimensionnement d'un système énergétique d'origine renouvelable tel que le système photovoltaïque ou système éolien consiste à déterminer les valeurs numériques de chaque constituant, depuis

la source jusqu'aux charges à alimenter en passant par les éventuels interfaces. Donc pour une charge donnée, il faut trouver la puissance que le générateur renouvelable peut fournir pour satisfaire une charge donnée. Par exemple pour le solaire PV on doit déterminer la puissance crête des modules, la capacité de stockage, la puissance pour le convertisseur, etc.

Pour effectuer ce dimensionnement, il faut considérer la demande énergétique d'une part (la consommation) et l'apport énergétique disponible dans le site étudié. Par exemple le gisement éolien pour les systèmes éoliens et le gisement solaire pour les systèmes PV sans oublier la gestion intermédiaire de cette énergie.

Dans cette partie de ce module on s'intéresse uniquement pour les systèmes solaires PV.

### III.9.1 Méthodes de dimensionnement utilisées

La détermination des éléments d'un système de source renouvelable nécessite l'application des méthodes pour le calcul de la taille de ces éléments. Ces méthodes varient selon la nature d'application et le type méthodes utilisée. Pour les systèmes PV on a deux types : les systèmes autonomes (au fil du soleil et avec stockage) et les systèmes à injection au réseau (centralisés et les systèmes décentralisés). Pour les méthodes on a celles qui sont basées sur le calcul et celles qui sont basées sur l'application de logiciels. Les logiciels photovoltaïques professionnels sont indispensables pour les bureaux d'études, architectes, installateurs, qui souhaitent estimer précisément la production photovoltaïque d'un générateur et dimensionner l'ensemble des composants du système : panneaux, onduleurs, câblage...

### III.9.2 logiciels (<https://photovoltaique-energie.fr/logiciels-photovoltaïques-professionnels.html>)

On trouve plusieurs sortes de logiciels dont les uns sont gratuits et les autres payants. Voilà quelques exemples de logiciels et des outils de calcul.

N0	Logiciel	Description
1	RETscreen – Natural Resources Canada, Canada	Logiciel de gestion d'énergies propres pour l'analyse de faisabilité de projets d'efficacité énergétique, d'énergies renouvelables et de cogénération ainsi que pour l'analyse de la performance énergétique en continu
2	Hybrid2 - NREL, États-Unis	Outil permettant d'effectuer des analyses de performance et économiques détaillées à long terme sur une grande variété de systèmes de production hybrides.
3	Homer Pro – Homer Energy, États-Unis	Logiciel de référence pour concevoir des micro-réseaux dans tous les secteurs; alimentation de villages et de services publics insulaires, campus et bases militaires. Il intègre trois outils puissants dans un seul logiciel; simulation, optimisation et analyse de sensibilité
4	PVGIS - JRC, Europe	Outil d'estimation du gisement solaire. Il permet également de simuler la production de systèmes photovoltaïques connectés au réseau et en site isolé en Europe et en <b>Afrique</b>
5	PVsyst – Pvsyst SA, Suisse	Logiciel de dimensionnement de panneaux solaires permettant d'obtenir diverses informations telles que la production d'énergie, l'irradiation et le coût de l'installation, la surface nécessaire, ou la production annuelle d'énergie. Un mode avancé permet d'obtenir beaucoup plus d'informations pour une étude très complète
6	PV Designer Software -	Ce logiciel est pour les systèmes résidentiels et commerciaux. Il permet de dessiner les contours du toit, de spécifier les marges de

	Solmetric, États-Unis	recul et les zones interdites. Il permet d'incorporer les mesures d'ombrage SunEye à des emplacements spécifiques du toit, de disposer les modules, les chaînes de modules, de vérifier la compatibilité des onduleurs et de calculer la production d'énergie du système
7	CANECO Solar	Logiciel développé par la société ALPI (France). Il facilite la conception d'installations électriques photovoltaïques, pour les parties DC & AC. Il permet de concevoir l'installation de manière économique conformément au guide pratique UTE C15-712-1 de juillet 2010. Il fournit aussi tous les schémas et documents nécessaires à la conception, réalisation et vérification de l'installation.
8	PV Tecsol - Tecsol, France	Logiciel de simulation de production électrique injectée dans le réseau par un système photovoltaïque
9	PV isolé Tecsol - Tecsol, France	Logiciel de simulation de dimensionnement d'un système en photovoltaïque en site isolé fonction des besoins en consommation
10	SolarPlus - Solaris, Australie	Ensemble d'outils de conception, de vente et d'installation. Modélisation énergétique; consommation, énergie solaire, stockage sur batterie, réseau, groupe électrogène. Rapports complets sur le retour sur investissement
11	Archelios Pro	Application en ligne permettant de concevoir tout type d'installation photovoltaïque (sur toitures, au sol, injection réseau, sites isolés ou auto-consommation).
12	LISE PV	Logiciel de calcul électrique dédié aux installations photovoltaïques, qui permet leur dimensionnement complet, depuis les modules jusqu'au point de raccordement énergie renouvelable –réseau quelle que soit la puissance produite. Comme il peut exécuter des calculs et contrôles de conformité selon- le guide UTE C15-712-1

### III.9.3 Méthodes de Calcul

Les étapes générales de dimensionnement d'un système sont résumées comme suit:

Étape 1: Déterminez l'irradiation solaire journalière en heures solaires équivalentes (ESH).

Étape 2: Déterminez la charge totale.

Étape 3: Déterminez la taille du champ PV (puissance crête) et choisissez le type de modules

Étape 4: Déterminez la taille de la batterie (capacité) qui peut satisfaire la charge durant le nombre de jours d'autonomie.

Étape 5: Choisissez un onduleur approprié.

Étape 6: Choisissez la section des câbles.

Étape 7: Déterminez le coût total du système



## Evaluation du chapitre

### Compréhension:

- ✓ L'énergie éolienne (ou aérogénérateurs) est produite par : Le vent
- ✓ Répond par « vrai » ou « faux » :
- ✓ Le vent nait des différences de pressions atmosphériques autour du globe. Vrai
- ✓ L'énergie éolienne ne permet pas de fabriquer de l'électricité. faux
- ✓ Une éolienne est composée du mât, l'hélice et la nacelle. faux
- ✓ L'énergie éolienne n'émet pas de gaz à effet de serre. Vrai
- ✓ Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes car (la cause) le vent exerce une force et les fait tourner « vrai »
- ✓ Les éoliennes fonctionnent sur le même principe que les moulins. Le vent fait tourner les hélices placées au sommet d'un mât. Les éoliennes sont généralement placées dans des zones dégagées et venteuses. Vrai

### Le calcul de la puissance d'éoliennes

Plusieurs types d'éoliennes sont actuellement disponibles sur le marché. Chacune de ces éoliennes, par leur conception, ont des puissances différentes qu'il est possible d'exprimer de la sorte :

- Les éoliennes à axe horizontal, d'une hauteur allant de 25 à 180 mètres, ont une puissance qui peut aller de 100 Kw à 7,5 MW. La plupart des éoliennes aujourd'hui installées ont une puissance allant de 1 à 3 MW et sont rassemblées en fermes d'éoliennes avec une puissance allant de 6 à 210 MW.
- Les éoliennes domestiques d'une hauteur maximale de 12 mètres, permettent de délivrer une puissance de 100 watts à 20 Kw.
- Les autres types d'éoliennes (à axes verticaux, de type Darrieus, à voilure tournante...) auront des puissances variables mais qui n'excéderont que très rarement 1 MW.

### Exercice n° 1

Calculer la densité de puissance théorique qui correspond à un vent de 40km/h.

Justifier si ce vent est intéressant pour être exploité par un aérogénérateur.

### Exercice n° 2

Calculer la puissance par unité de surface récupérable par un aérogénérateur de rendement  $C_p = 0.4$  quand le vent souffle à 36Km/h, avec une densité de l'air de  $1,2 \text{ Kg/m}^3$ .

Répéter le même calcul pour 20 m/s.

### Exercice n° 3

A quelle vitesse doit souffler le vent pour obtenir une puissance  $P_{\text{théorique}}$  de  $2000 \text{ W/m}^2$ , avec une densité de l'air:

$$\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

#### Exercice n° 4 Longueur d'une pale

Nous voulons dimensionner les pales d'une éolienne à vitesse fixe pour obtenir une puissance mécanique de 650 kW pour une vitesse de vent de 13 m/s.

On considère un coefficient de puissance  $C_p$  égal à 0,2. Quel sera la longueur de notre pale ou le rayon de la surface balayée par la turbine ?

On utilise la formule suivante:

$$S = \frac{2.P}{C_p V^3 \rho}$$

#### Exercice n° 5: La puissance l'éolienne

Une éolienne a les caractéristiques suivantes:

- Diamètre de rotor: 100m avec 3 pales;
- Coefficient d'efficacité  $C_p = 0,44$

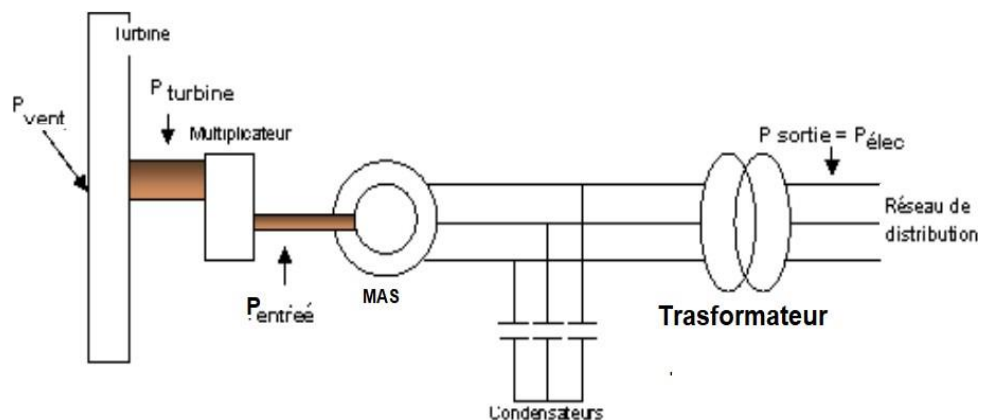
1. Calculer la puissance captée par l'éolienne pour une vitesse de vent de 7 m/s puis pour une vitesse de vent de 10 m/s.

- La masse volumique de l'air  $\rho = 1,25\text{kg/m}^3$ ;
- Diamètre de rotor : 100 m avec 3 pales, Coefficient d'efficacité  $C_p = 0.44$

2. Quels paramètres faut-il prendre en compte lors du choix et de l'installation d'une éolienne ?

#### Exercice n° 6 Etude d'une génératrice asynchrone d'éolienne

L'éolienne sert à transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. On propose d'étudier la génératrice asynchrone à cage d'une éolienne installée au sein d'une ferme éolienne de  $P_{totale}$  de 7,5 MW. Les éoliennes fonctionnent à vitesse fixe, la génératrice est reliée au réseau. On va déterminer la puissance, la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice, et le schéma équivalent de la génératrice. Les éoliennes comportent des multiplicateurs. Le schéma est le suivant :



Soient les données suivantes :

$V = 10$  m/s, la vitesse du vent nominale supposée constante

$N = 35$  tr/min, la vitesse nominale de la turbine éolienne



La masse volumique de l'air  $\rho = 1,25\text{kg/m}^3$

$C_p = 0,3$ , le coefficient aérodynamique

$R = 21,7$  m le rayon des pales

Calculez la puissance électrique en sortie de la génératrice  $P_{elec}$  et la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice sachant que le multiplicateur utilisé a un rapport de 46,48 et un rendement de 96% et que les éoliennes tournent à 32,5 tr/min. Les pertes dues à la génératrice sont supposées négligeables.[63]

### Exercice 7

Calculer la densité de puissance théorique qui correspond à un vent de 60km/h. Justifier si ce vent est intéressant pour être exploité par un aérogénérateur.

### Exercice 8

Calculer la puissance par unité de surface récupérable par un aérogénérateur de rendement  $C_p = 0.4$  quand le vent souffle à 36Km/h , avec une densité de l'air de  $1,2 \text{ Kg/m}^3$  . Répéter le même calcul pour 20 m/s.

### Exercice 9

A quelle vitesse doit souffler le vent pour obtenir une puissance  $P_{théorique}$  de  $2000 \text{ W/m}^2$ , avec une densité de l'air:  $\rho = 1,293\text{kg/m}^3$

### Corrigé de l'exercice n° 1

La formule théorique qui nous donne la puissance du vent est:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3,$$

où  $\rho$  est la densité de l'air qui est d'environ:  $\rho = 1,225\text{kg/m}^3$ ,

$S$  est la surface balayée, et  $v$  la vitesse du vent

Il faut d'abord passer la vitesse du vent de km/h à m/s pour pouvoir l'introduire dans la formule (de manière à utiliser les unités du système international SI):

$$40 \text{ km/h} = 40\text{km/h} \cdot 1000\text{m} / 1\text{km} \cdot 1\text{h} / 3600\text{s} = 11,12 \text{ m/s}$$

En introduisant cette valeur, ainsi que la densité de l'air dans la formule, et en la divisant par la surface pour obtenir la densité de puissance nous obtenons:

$$P_{vent}/S = \frac{1}{2} \cdot 1,225\text{kg/m}^3 \cdot (11,12 \text{ m/s})^3 = 842,21 \text{ W/m}^2$$

**Remarque:** ceci est la puissance théorique. En pratique, la puissance récupérable par un aérogénérateur sera toujours inférieure et dans tous les cas limitée par le rendement de Betz (16/27), soit ici :  $842,21 \cdot 16 / 27 = 499 \text{ W/m}^2$

L'expérience montre que les aérogénérateurs actuels ont habituellement des vitesses de démarrages comprises entre 3 et 4 m/s, et que pour des vitesses de vent de l'ordre 10m/s, ils travaillent dans une zone proche de leur puissance nominale.

### Corrigé de l'exercice n° 2

$$V_{\text{vent}} = 36\text{Km/h} \times 1000/1\text{km} \times 1\text{h}/3600\text{s} = 10\text{m/s}$$

$$P_{\text{aérog/surface}} = 0.4 \times P_{\text{vent/surface}} \quad P_{\text{aérog/surface}}$$

$$= 0,4 \times 1/2 \times 1,2 \text{ Kg/m}^3 \times (10\text{m/s})^3 = 240\text{W/m}^2 \text{ pour un vent de } 36 \text{ km/h} \quad P_{\text{vent/surface}} = 0,4 \times 1/2 \times 1,2 \text{ Kg/m}^3 \times (20\text{m/s})^3 = 1920\text{W/m}^2$$

### Corrigé de l'exercice n° 3

$$P_{\text{vent}} / S = 2000\text{w/m}^2 = 1/2 \times 1,293 \text{ Kg/m}^3 \times v^3 \quad v = \text{racine cubique } (2000 \times 2 / 1,29^3) = (3093,58)^{1/3} \quad v = 14,57 \text{ m/s}$$

Si la vitesse du vent se réduit de 10%, de quel pourcentage se réduit la puissance?  $P(\text{vent} \times 0,9) = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot (v \times 0,9)^3 = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot (0,9)^3$

$$P(\text{vent} \times 0.9) = P(\text{vent}) \cdot 0,729$$

La puissance se réduit de  $1-0,729 = 27,1 \%$

### Corrigé de l'exercice n° 4

Avec les données suivantes

$$P = 650 \cdot 10^3 \text{ W} ; V = 13 \text{ m/s} ; C_p = 0,2 ; \rho = 1,25 \text{ Kg /m}^3 ; S = 2.650 \cdot 10^3 / 0,2 \cdot 13^3 \cdot 1,25$$

$$\text{D'où } R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

### Corrigé de l'exercice n° 6

La puissance du vent à l'entrée de la turbine est :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

Le vent passe ensuite à travers les pales de la turbine, la puissance récupérée est égale à la puissance du vent, au coefficient  $C_p$  près :

$$P_{\text{turbine}} = \frac{1}{2} C_p \rho S V^3$$

$$P_{\text{turbine}} = \frac{1}{2} 0,27 \cdot 1,25 \cdot (\pi \cdot 21,7^2) \cdot 15^3 = 842\text{kW}$$

La puissance mécanique récupérable à l'entrée de la génératrice est :

$$P_{\text{entrée}} = P_{\text{Turbine}} \eta_{\text{multiplicateur}} - 8420,96 = -808 \text{ kW}$$

Cette puissance est négative, car la machine est en fonctionnement génératrice. Ce qui nous intéresse, c'est la puissance électrique obtenue en sortie de la génératrice. Par hypothèses, les pertes dues à la génératrice étant supposées négligeables :

$$P_{\text{entrée}} \approx P_{\text{sortie}} \text{ et}$$

$$P_{\text{sortie}} = P_{\text{électrique}}$$

On en déduit que :

$$P_{\text{électrique}} = -808 \text{ kW}$$

On calcule la vitesse de rotation de la génératrice :

$$\Omega_{\text{MAS}} = \Omega_{\text{éolienne}} \text{ Rapport}$$

$$\Omega_{\text{MAS}} = \frac{325,2\pi}{6046,48} = \frac{158,5 \text{ rad}}{\text{s}}$$

### Corrigé de l'exercice n° 7

La formule théorique qui nous donne la puissance du vent est:

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3,$$

Où:

$\rho$  est la densité de l'air qui est d'environ  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ,

$S$  est la surface balayée, et  $v$  la vitesse du vent.

Il faut d'abord passer la vitesse du vent de km/h à m/s pour pouvoir l'introduire dans la formule (de manière à utiliser les unités du système international SI):

$$60 \text{ km/h} = 60 \text{ km/h} \cdot 1000 \text{ m} / 1 \text{ km} \cdot 1 \text{ h} / 3600 \text{ s} = 16.66 \text{ m/s}$$

En introduisant cette valeur, ainsi que la densité de l'air dans la formule, et en la divisant par la surface pour obtenir la densité de puissance nous obtenons:

$$P_{\text{vent}}/S = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot (16.66 \text{ m/s})^3 = 2832.24 \text{ W/m}^2$$

Attention, ceci est la puissance théorique. En pratique, la puissance récupérable par un aérogénérateur sera toujours inférieure et dans tous les cas limitée par le rendement de Betz (16/27), soit ici :

$2832.24 \cdot 16 / 27 = 1678.36 \text{ W/m}^2$  En pratique, l'expérience montre que les aérogénérateurs actuels ont habituellement des vitesses de démarrages comprises entre 3 et 4 m/s, et que pour des vitesses de vent de l'ordre 10m/s, ils travaillent dans une zone proche de leur puissance nominale.

### Corrigé de l'exercice n° 8

$$V_{\text{vent}} = 36\text{km/h} \times 1000/1\text{km} \times 1\text{h}/3600\text{s} = 10\text{m/s}$$

$$P_{\text{aérog/surface}} = 0.4 \times P_{\text{vent/surface}} \quad P_{\text{aérog/surface}}$$

$$= 0,4 \times 1/2 \times 1,2 \text{ Kg/m}^3 \times (10\text{m/s})^3 = 240\text{W/m}^2 \text{ pour un vent de } 36 \text{ km/h}$$

$$P_{\text{vent/surface}} = 0,4 \times 1/2 \times 1,2 \text{ Kg/m}^3 \times (20\text{m/s})^3 = 1920\text{W/m}^2$$

### Corrigé de l'exercice n°9

$$P_{\text{vent/S}} = 2000\text{w/m}^2 = 1/2 \times 1,293 \text{ Kg/m}^3 \times v^3$$

$$V = \text{racine cubique} ( 2000 \times 2 / 1,29^3 ) = (3093,58)^{1/3} \quad v = 14,57 \text{ m/s}$$

Si la vitesse du vent se réduit de 10 %, de quel pourcentage se réduit la puissance ?

$$P (\text{vent} \times 0,9) = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot (v \times 0,9)^3 = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot (0,9)^3$$

$$P (\text{vent} \times 0.9) = P (\text{vent}) \cdot 0,729$$

La puissance se réduit de  $1-0,729 = 27,1 \%$

# Chapitre-IV                    **Autres Ressources Renouvelables :** **Hydraulique, Géothermique, Biomasse...**

## *Ressource énergétique hydraulique*

### **IV.1.1 Introduction**

Le bois et la force animale fournissant l'essentiel de l'énergie utilisée par l'homme. Mais, utilisée depuis longtemps pour entrainer des machines, l'énergie hydraulique fournissait la plus grande partie de l'énergie mécanique. Actuellement, l'énergie hydraulique représente 6 à 7 % de l'énergie consommée mondialement, mais près de 20 % de l'électricité, [22].

L'énergie hydraulique est une énergie peu concentrée : pour produire 1kWh électrique dans une usine ayant un rendement de 85 %, il faut faire chuter 10 tonnes d'eau d'une hauteur de 40 m.

Il en résulte que, pour produire des quantités importantes d'électricité, il faut soit disposer de gros débits, soit d'une grande hauteur de chute, ce qui dépend du bassin versant et de la pluviométrie.

Cependant, vu le manque, des grandes hauteurs de chute, on parle alors que de « petite hydraulique » ; la puissance de ces unités va de quelques kW à MW, [22-23].

### **IV.1.2 Les différents types d'ouvrage hydrauliques**

#### **IV.1.2.1 Les bassins versants et le stockage naturel de l'eau**

L'énergie hydraulique est une énergie solaire. L'eau évaporée par la chaleur solaire, pour plus grande partie sur les grands étendus d'eau (océan, mers, grands lacs) mais également sur les terres, par vaporisation, se condense sous forme de précipitations, et ceci de préférence sur les montagnes.

Grace à ce mécanisme, l'eau gagne une énergie potentielle directement proportionnelle à l'altitude et son point de chute.

Une partie de cette eau s'infiltrer dans le sol, alimente des nappes phréatiques et réapparaît plus ou moins bas. Une autre partie est stockée sous forme de neige ou de glace, et est susceptible d'être déstockée au moment de la fonte des neiges. Le reste s'écoule vers les rivières.

Le bassin versant d'une rivière désigne l'ensemble des zones dont l'eau de pluie s'écoule vers la rivière. Plus il est grand, et plus il reçoit de précipitation, stockée ou pas sous forme de glace, plus le « potentiel hydraulique » de la rivière sera important.

### IV.1.2.2 Les différents types d'aménagements hydrauliques

Chaque site possède ses propres caractéristiques, hydrauliques, géographiques, topologiques, et il sera aménagé en fonction de ces caractéristiques et ses objectifs poursuivis : fourniture quasi permanente d'électricité, fourniture en période de point uniquement, stockage temporaire, etc.. Bien que chaque aménagement hydraulique soit très spécifique du site, les différents aménagements peuvent être classés en quelques grandes familles, citant :

- les aménagements avec retenus,
- les aménagements « au fil de l'eau »,
- les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP),
- les différents types de turbines.

### IV.1.3 La petite hydraulique

La situation mondiale en 2000 de la puissance installée de l'énergie produite par les installations hydrauliques est représentée dans le tableau IV.1. La production hydraulique représente plus de 50 % de l'électricité générée dans 61% pays, plus de 80% dans 31 pays et 100% dans 13 pays, [23].

Tableau IV-1 : Situation mondiale en 2000 de la puissance des installations hydrauliques

Pays Puissance	Amérique		Europe (ouest et est)	Afrique	Asie	Océanie
	Nord et Centrale	Sud				
Puissance installée (GW)	157	108	171	20	225	11
Electricité produite (TWh)	700	512	565	75	750	42
Puissance en cours de construction (GW)	12	14,8	2,2	2,3	84	-

#### IV.1.3.1 L'énergie de la petite hydraulique

Le terme de « petite hydraulique » désigne communément des installations de capacité inférieure ou égale à 10 MW. Petite Centrale Hydroélectrique (PCH).

Ce seuil, d'une part, lié à des considérations administratives ou juridiques, diffère selon les pays, au Brésil ou en Chine, ces limites peuvent atteindre 50MW, d'autre part, il existe autant d'influences et impacts sur le milieu environnemental, sociaux, etc.

La "petite hydraulique" appartient à la famille des énergies renouvelables. La commission européenne dans sa directive du 27 septembre 2001 traitant de l'électricité produite à partir des sources EnR, entend ainsi par sources EnR l'énergie hydraulique sans distinction de puissance

#### **IV.1.3.2 Comment fonctionne l'énergie hydroélectrique ?**

Les barrages hydroélectriques créent et fournissent l'énergie électrique. Ils sont bâtis sur de grands fleuves pour ralentir leur courant normal, ils sont faits de ciment et d'acier. La plupart ont plus de 30 mètres de haut, et certains atteignent même jusqu'à 150 mètres de haut. Plus le barrage est grand, plus il retient d'eau. L'eau qui est ainsi retenue est gardée dans un endroit appelé réservoir.

Pour générer l'électricité, l'eau contenue dans le réservoir est d'abord amenée très haut avant d'être déversée brusquement à travers un conduit. Au bout de ce conduit se trouvent des roues appelées turbines. La force de l'eau qui tombe de haut fait tourner ces turbines. Et pendant qu'elles tournent, elles font tourner le générateur qui produit l'électricité.

L'électricité est transportée le long de lignes à haute tension vers des stations d'où l'on dirigera l'électricité vers les maisons ou vers les usines. Pendant ce temps, l'eau retournera dans le fleuve.

## **IV.2 La Géothermie**

La **géothermie**, du grec géo « la Terre » et thermos « la chaleur », 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. En effet, La **géothermie** est un raccourci populaire pour parler d'énergie géothermique avec la production d'électricité ou de chauffage. L'énergie géothermique est considérée comme durable de par sa faible extraction de chaleur (en quantité) par rapport à la chaleur (d'un point de vue thermique) du contenu de la Terre. C'est une branche de la géophysique qui étudie le régime thermique dans la croûte terrestre, elle inclut généralement l'étude des volcans, des geysers, des fumerolles, etc.

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 et se charge de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.

Donc pour on exploite les gisements d'eau chaude du sous-sol pour chauffer des logements, la climatisation ou la production d'électricité par le biais de différentes technologies (voir figure IV-1).

Elle se définit comme l'exploitation de la chaleur stockée dans l'écorce terrestre ayant pour origine à la fois le refroidissement du noyau terrestre et surtout la désintégration naturelle des éléments radioactifs contenus dans les roches profonde.

L'énergie géothermique est présente partout à la surface du globe ; elle se manifeste par le gradient géothermique (élévation de la température avec la profondeur) qui est en moyenne de 3,3 °C. Des variations locales de gradient géothermique sont néanmoins observées ; elles sont reliées à l'âge des formations géologiques et à leur composition. L'énergie géothermique peut être la Terre est chaude la chaleur terrestre qui se propage à travers la croûte continentale (appelé flux de chaleur) n'est pas homogène; le flux de chaleur varie donc d'un endroit à un autre. En présence d'un flux de chaleur élevées eaux souterraines se réchauffent et se transforment en eau thermale. Les eaux deviennent chaudes et remontent en surface sous différentes formes. Ces formes peuvent être:

#### *A.Geysers:*

Dans les pays volcaniques, l'eau bouillante jaillit à la surface sous forme de jets atteignant jusqu'à 50 m de haut. Exemple : Les geysers d'Islande, de Nouvelle-Zélande ou de Californie ;

#### *B.Fumerolles:*

Ce sont des fentes à partir desquelles des gaz volcaniques, la plupart du temps vapeur d'eau, s'échappent vers l'atmosphère. Exemple: Fumerolles en Italie à Larderello ;

#### *D.Sources thermales:*

Ce sont des émanations d'eau, de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique à température élevée. Elles doivent leur origine à des émanations de vapeur d'eau provenant de zones profondes qui, lorsqu'elles atteignent les couches superficielles, se refroidissent et se condensent, donnant naissance à des eaux de températures très élevées.

Le potentiel installé est de 16 GW. Mais pas de centrale électrique Algérienne, Malgré que autant de site exploité pour autres applications. Exemple: Les sources thermales du Nord de l'Algérie.

### ***IV.2.1 Formes d'exploitations de la géothermie***

Il faut distinguer les deux formes principales d'exploitation de l'énergie géothermique:

- l'énergie géothermique de surface
- l'énergie géothermique profonde



L'énergie géothermique de surface est exploitée en récupérant de la chaleur en hiver et de la fraîcheur en été dans la couche superficielle du sol.

Cette énergie est exploitée pour des besoins individuels (maison) en utilisant l'inertie thermique du sol. En effet, à une certaine profondeur, la température du sol subit peu de variations et constitue une réserve thermique inépuisable grâce aux apports permanents du soleil et de la pluie.

Ce fait est bien connu des amateurs de vin qui exploitent cette propriété du sol pour conserver leurs bouteilles dans des caves. On utilise cette énergie avec une pompe à chaleur qui permettra de récupérer chauffer ou de refroidir la maison.

Elle nécessite d'utiliser une surface de sol libre (terrain) pour y enfouir un capteur extérieur enterré à 60 cm environ de profondeur sur une surface proportionnelle à la quantité d'énergie à récupérer ou d'une sonde géothermique verticale.

L'énergie géothermique profonde consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage (température inférieure à 90°) ou de l'électricité (température entre 90 et 150°).

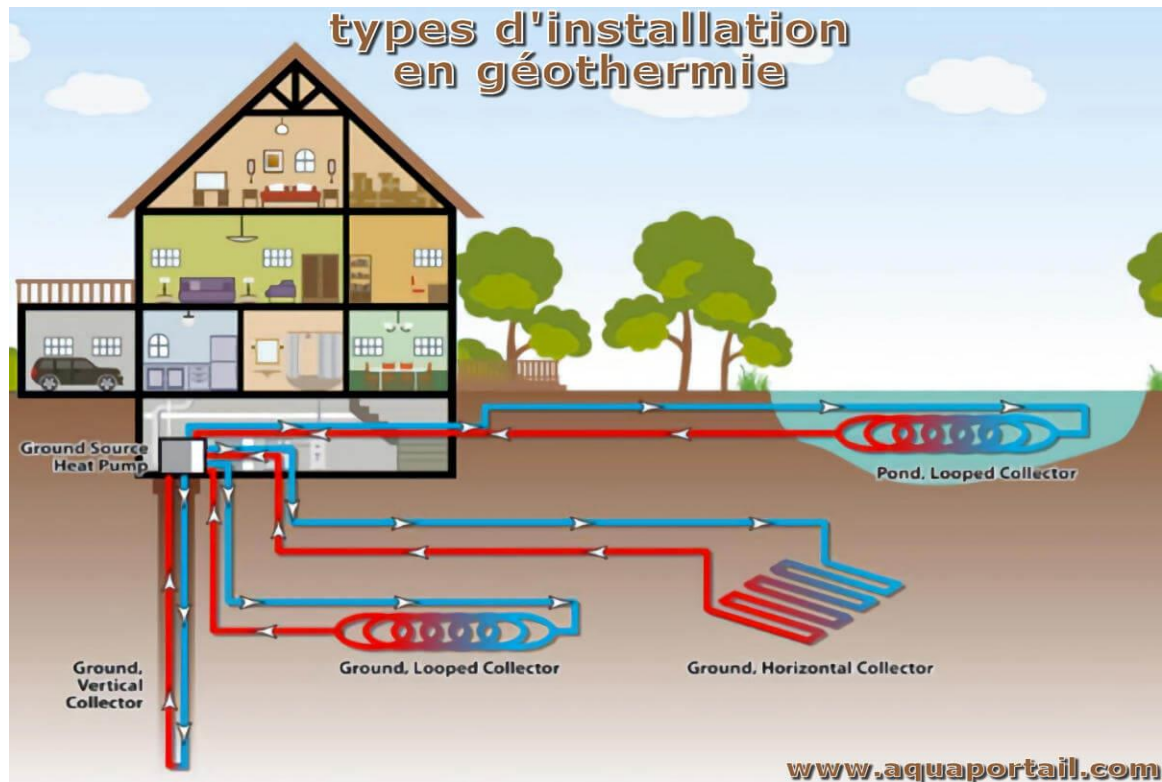
On l'exploite en récupérant l'eau circulant dans des couches géologiques jusqu'à plusieurs milliers de mètres de profondeur. Cette eau est captée sous forme liquide ou de vapeur pour produire du chauffage et/ou de l'électricité. C'est une énergie qui se transporte difficilement, elle doit donc être utilisée sur place.

Les investissements pour pomper l'eau chaude et/ou injecter de l'eau peuvent parfois être importants.

#### ***IV.2.2 Types de géothermie***

On distingue habituellement trois types de géothermie (voir figure IV.1) :

- la géothermie peu profonde (moins de 1 500 m) à basse température ;
- la géothermie profonde à haute température (plus de 150 °C), avec plusieurs approches développées et exploitées depuis les années 1970.



*Figure IV.1: Types de géothermie*

- la géothermie très profonde à très haute température.

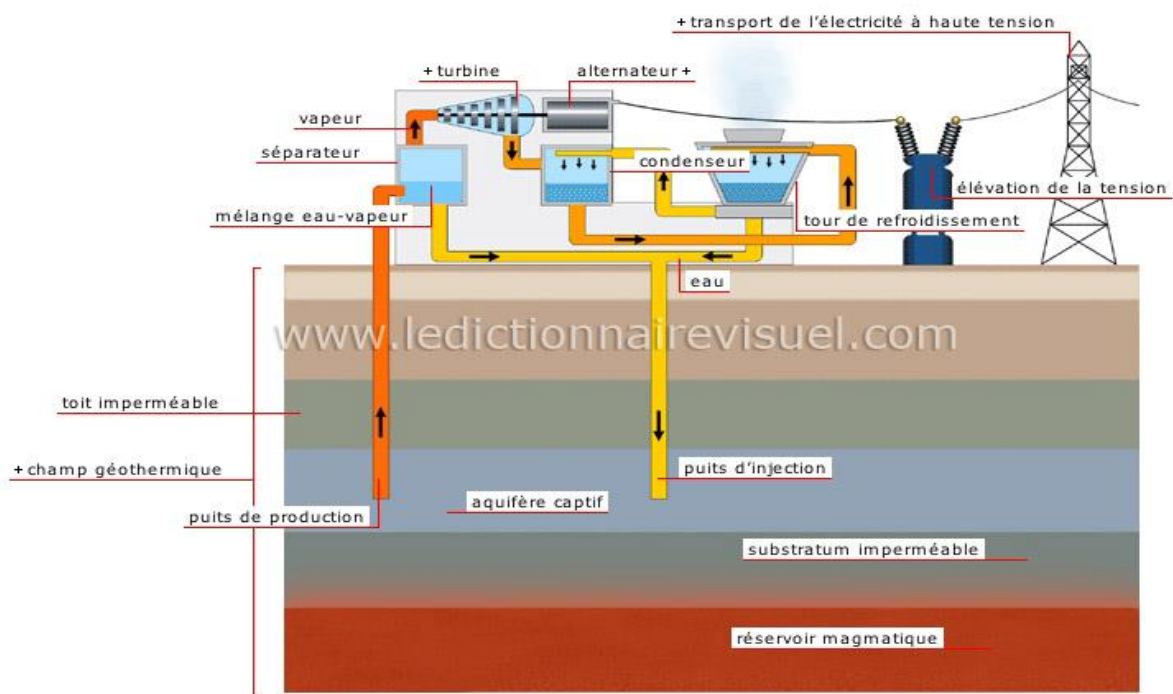
Ces trois types ont en commun de prélever la chaleur contenue dans le sol, issue de la pression, et, dans certains cas, d'une plus ou moins grande proximité du magma.

### IV.2.3 Fonctionnement

Tout se joue grâce au changement d'état, quand un fluide passe de l'état liquide à l'état gazeux, et inversement. Un long tuyau de polyéthylène ou de cuivre gainé de polyéthylène est par exemple enterré dans le sol (jardin...). Dans le cas des systèmes à détente directe, on fait circuler à l'intérieur, un fluide qui de l'état liquide se réchauffe un peu au contact de la terre. Comme ce fluide a la propriété de se mettre à bouillir à très basse température, il passe alors de l'état liquide à l'état gazeux.

Cette vapeur est comprimée par un compresseur situé dans la maison. Le simple fait de la comprimer a pour effet d'augmenter sa température. Elle est alors conduite à un condenseur qui la refait passer à l'état liquide. Lors de ce changement d'état, il se dégage à nouveau de la chaleur, qui est transmise à l'eau de chauffage (radiateur, planché chauffant...). Le fluide continue son cycle, et après s'être détendu et refroidi, repart en circuit fermé rechercher de

la chaleur dans la terre du jardin. Voir la Production de l'électricité par le système Géothermique dans le monde dans la Figure IV-2.



**Figure IV-2.** Production de l'électricité par le système Géothermique dans le monde

Il existe trois sortes de systèmes :

- le système eau glycolée / eau
- le système sol/eau (le fluide frigorigène se détend directement dans les capteurs enfouis dans le sol)
- le système sol/sol (*idem* au sol eau en ce qui concerne le capteur et avec condensation du fluide frigorigène dans le plancher).

### **IV.3 La Biomasse**

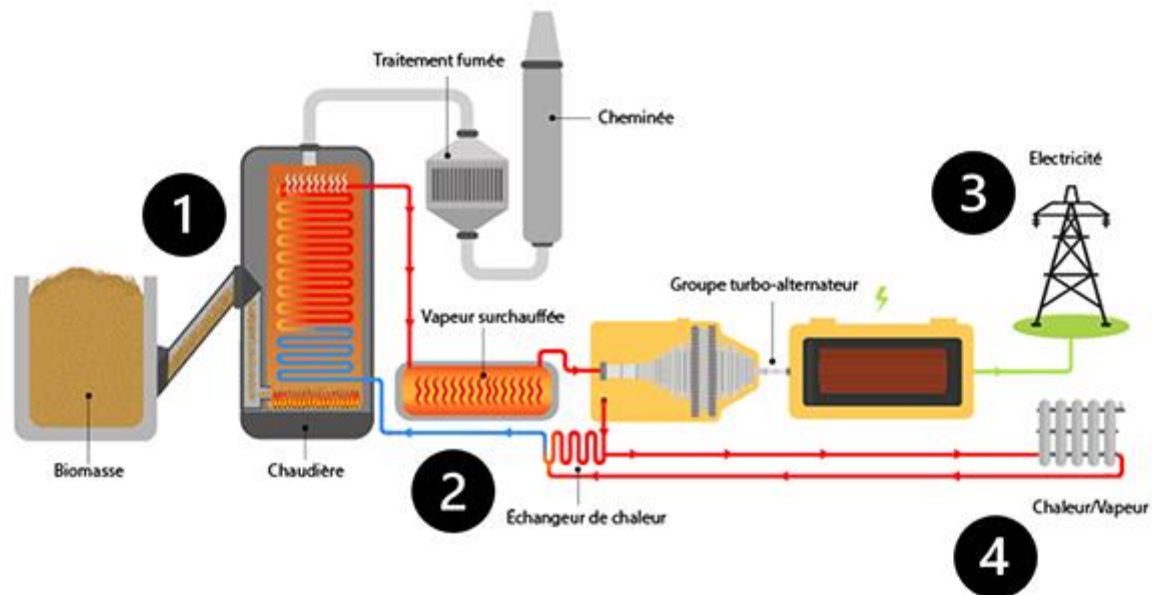
Biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale, animale ainsi que ses produits de transformation (les déchets organiques). A partir de la biomasse (des végétaux), on peut obtenir de l'énergie sous différentes formes.

L'avantage de la conversion énergétique de la biomasse, par rapport aux autres sources énergétiques renouvelables, réside dans le fait qu'en plus de la production d'énergie, elle participe activement au traitement des déchets organiques contribuant ainsi à la réduction de l'impact de nos activités sur l'environnement. La production de biomasse est divisée en plusieurs catégories :

- Biomasse produite par le surplus des terres agricoles, non utilisées pour l'alimentation humaine ou animale : cultures énergétiques,
- Biomasse produite par le déboisement (entretien de forêt) ou le nettoyage de terre agricole. résidus agricoles issus des cultures des céréales, vignes, verges oliviers, fruits et légumes ; résidus de l'agroalimentaire. résidus forestiers issus de la sylviculture et de la transformation du bois, résidus agricoles issus de l'élevage (fumier, lisier, litières...),
- Déchets organiques des ménages (fraction fermentescibles des ordures ménagères (FFOM), papiers, cartons, déchets verts).
- Biomasse directement utilisée à des fins non alimentaires (bois pour le papier), déchets organiques des déchets industriels banals (papiers, cartons, bois, déchets putrescibles.

#### ***IV.3.1 Le fonctionnement d'une centrale biomasse***

Une centrale biomasse produit de l'électricité à partir de la vapeur d'eau qui se dégage lors de la combustion de matières végétales ou animales, effectuée dans une chambre de combustion. Ce processus se fait en plusieurs étapes (*Voir figure IV.2*) :



*Figure IV.3:* Une centrale biomasse produit de l'électricité

**1. La combustion :** La biomasse est brûlée dans une chambre à combustion.

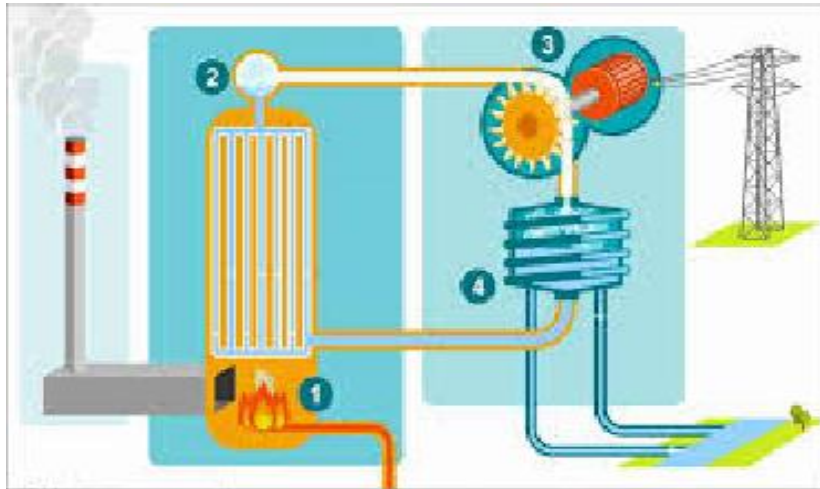
**2. La production de vapeur :** La biomasse dégage de la chaleur qui va chauffer de l'eau dans une chaudière. L'eau se transforme en vapeur, envoyée sous pression vers des turbines.

**3. La production d'électricité :** La vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne et haute tension.

**4. Le recyclage :** A la sortie de la turbine, une partie de la vapeur est récupérée pour être utilisée pour le chauffage. C'est ce que l'on appelle la cogénération.

#### IV.3-1 Électricité ou chauffage par combustion directe

- Biogaz obtenu par fermentation.
- Alcool ou biocarburant (à partir de canne à sucre, céréales, betteraves etc.).



**Figure IV.4 :** Électricité ou chauffage par combustion

#### **IV.4 Energie de la mer**

L'énergie de la marée est le produit des mouvements relatifs du Soleil, de la Lune et de la Terre, qui se conjuguent pour créer un cycle de changements gravitationnels et, par conséquent, des variations de la hauteur de la mer à un endroit donné. Une énergie potentielle est alors créée par l'élévation et le retrait du niveau de la mer durant ces cycles. Les variations forment aussi des courants marins, nommés courants de la marée, qui possèdent une énergie cinétique. Les deux types d'énergie peuvent être captés et plusieurs technologies sont présentement en développement à ces fins.

La technologie la plus évoluée dans ce domaine demeure le captage de l'eau dans un barrage construit dans un bassin ou un estuaire, qui relâche l'eau au moyen de la force gravitationnelle. Basés sur la hauteur de la marée, le flux et le reflux de l'eau font tourner la turbine à l'entrée du barrage pour produire de l'électricité

## V.1 Introduction

Les piles à combustibles et accumulateurs sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en [Wh] ; l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques, le terme batterie est utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires) ; Un accumulateur est défini par trois grandeurs :

- Sa densité d'énergie massique (ou volumique) en [Wh/kg] ou [Wh/l], correspondant à la quantité d'énergie stockée par unité de masse ou volume d'accumulateur.
- Sa densité de puissance, en [W/kg], représente la puissance que peut délivrer l'unité de masse accumulateur.
- Sa cyclabilité, le nombre fois de charge et décharge, caractérise la durée de vie de l'accumulateur,

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie. Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

## V.2. *La batterie et la pile à combustible (PAC)*

La batterie est un dispositif de stockage électrochimique, tandis que la pile à combustible (PAC) est un dispositif de conversion électrochimique. Les électrons qui composent l'électricité refusent d'être stockés dans un réservoir à cause de la charge électrique qui les empêche de se reposer quelques instants. C'est qu'on ne peut pas se contenter de faire comme pour l'essence et le gaz, à les entasser dans des contenants. On doit passer par un intermédiaire. Et cet intermédiaire, c'est le dispositif électrochimique. Son principe repose sur sa capacité à transformer de l'énergie chimique en énergie électrique, et inversement.

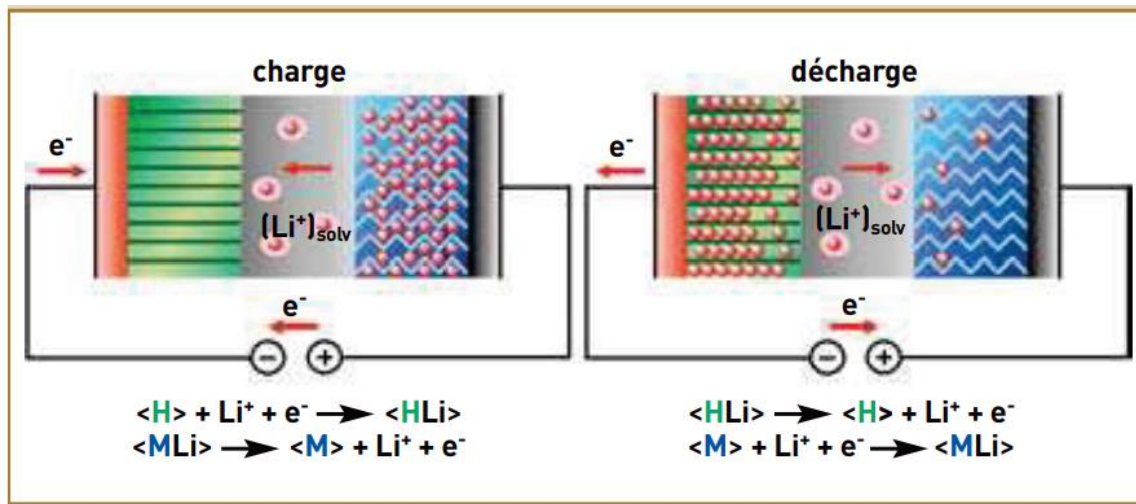


Figure V.1 Schéma de principe d'une batterie Lithium-ion. Source CEA, 2006.

Qu'elle est la source de cette nuance ? C'est le « combustible », qui est l'hydrogène (plus précisément, le dihydrogène). D'où l'expression « Pile à hydrogène ». Donc 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 PAC produit de l'électricité en continu. Alors tant qu'elle est alimentée par une source externe de combustible l'hydrogène en l'occurrence), elle génère de l'énergie électrique.

Une PAC permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau. Le cœur 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 [58].

- Une PAC est un dispositif électrochimique qui combine l'hydrogène et l'oxygène de l'air pour générer, grâce à une réaction d'oxydo-réduction, de l'énergie électrique ; l'eau et la chaleur sont les seuls sous-produits.
- Une PAC permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau. Le cœur d'une PAC est constitué de 3 éléments, dont 2 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.

Les accumulateurs et les piles sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie, (voir la comparaison dans le tableau 4.1, entre une batterie et une PAC). Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en kWh ; l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques, le terme batterie est utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires) ; Un accumulateur est défini par trois grandeurs [58-60]:

- Sa densité d'énergie massique (ou volumique), correspondant à la quantité d'énergie stockée par unité de masse ou volume d'accumulateur.
- Sa densité de puissance, représente la puissance que peut délivrer l'unité de masse accumulateur.
- Sa cyclabilité, le nombre fois de charge et décharge, caractérise la durée de vie de l'accumulateur.

**Tableau IV.1** Comparaisons, entre une PAC et une batterie [60]

	<b>Pile à combustible</b>	<b>Batteries</b>
Carburant	Hydrogène vert	Électricité réseau
Temps de recharge	Minutes	Heures
Autonomie	Grande	Limitée
Poids du système embarqué	Favorable	Pénalisant
Émissions GES (CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , etc.)	Négligeable	Négligeable
Émissions particules fines	Faible	Faible
Bilan environnemental global (fabrication, usage, recyclage, etc.)	Favorable	Favorable

### IV.3. Les différents constituants d'une PAC

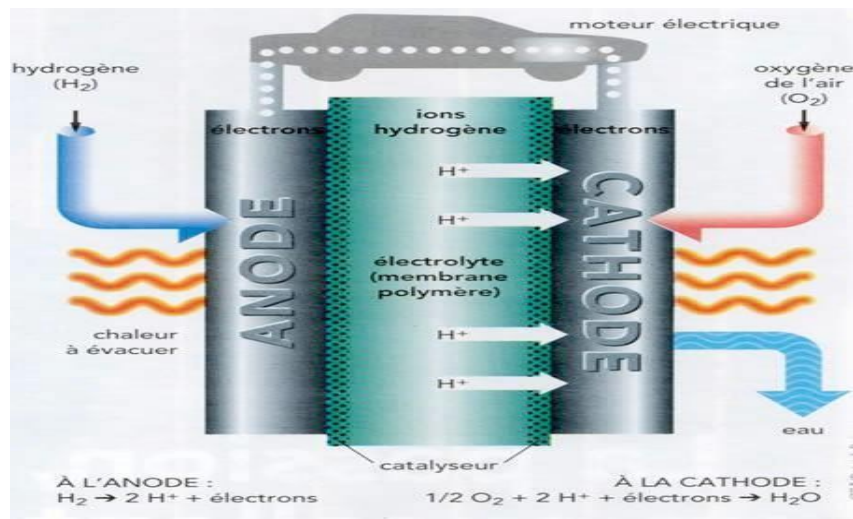
Une PAC est un assemblage de cellules élémentaires, comprenant deux électrodes (l'anode et la cathode) chargées en catalyseur (le plus souvent du platine), séparées par un électrolyte, dont le rôle est de permettre la migration des ions d'une électrode à l'autre, sous l'effet du champ électrique créé, voir Les différents constituants d'une PAC dans la figure IV.2.

Le principe fondamental de la pile à combustible est analogue à celui d'une pile galvanique réaction d'oxydo-réduction. Une réaction électrochimique s'écrit sous la forme :



Le potentiel de la réaction rédox est donné par l'équation de Nernst :

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left[ \frac{\text{produits}}{\text{reactifs}} \right] \quad (\text{V.2})$$



*Figure V.2. Les différents constituants d'une PAC*

### ***V.3. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible***

En 1839 Sir William Grove construisit la première cellule électrochimique fonctionnant avec de l'hydrogène, comme carburant, mettant en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du combustible. La pile à combustible ayant la particularité d'utiliser deux gaz (l'hydrogène  $H_2$  et  $O_2$ ) comme couple électrochimique, les réactions oxydo-réduction qui s'opèrent dans la pile sont donc particulièrement simples. La réaction se produit au sein d'une structure (la cellule électrochimique élémentaire) essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte, matériau permettant le passage des ions. Les électrodes mettent en jeu des catalyseurs pour activer d'un côté, la réaction d'oxydation de l'hydrogène, et de l'autre côté, la réaction de réduction de l'oxygène.

Dans le cas d'une pile à électrolyte acide (ou pile à membrane échangeuse de protons), l'hydrogène de l'anode se dissocie en protons (ou ion hydrogène  $H^+$ ) et en électrons, suivant la réaction d'oxydation :  $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ . À la cathode, l'oxygène, les électrons et les protons se combinent pour former de l'eau :  $1/2 O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ . Le principe de la pile à combustible est donc inverse à celui de l'électrolyse de l'eau, (voir figure VI-1). La tension thermodynamique d'une telle cellule électrochimique est de 1,23 V. Toutefois, en pratique, la pile présente une différence de potentiel de l'ordre de 0,6 V pour des densités de courant de 0,6 à 0,8 A/cm<sup>2</sup>. Le rendement d'une telle cellule est donc d'environ 50 %, l'énergie dissipée étant bien évidemment sous forme de chaleur.

## V.4 Principe de fonctionnement d'un accumulateur au Lithium

En cours d'utilisation, lors de la décharge de l'accumulateur, le Lithium relâché par l'électrode négative (matériau d'interaction hôte 'H' sous forme ionique  $\text{Li}^+$  migre à travers l'électrolyte conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive (composé d'insertion du Lithium du type oxyde métallique 'MLi'). Le passage de chaque ion  $\text{Li}^+$  dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un électron dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. La densité d'énergie massique libérée par ces réactions est à la fois proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux électrodes et à la quantité de Lithium qui se sera intercalé dans le matériau d'insertion. Elle est également inversement proportionnelle à la masse totale du système. Or le Lithium est en même temps le plus léger (avec une masse molaire atomique de 6,9 g) et le plus réducteur des métaux : les systèmes électrochimiques qui l'emploient peuvent atteindre des tensions de 4 V pour les autres systèmes. Il permet ainsi aux batteries au Lithium d'offrir les plus importantes densités d'énergie massique et volumique (typiquement plus de 160 Wh/kg et 400 Wh/l. supérieurs moyenne de plus de 50 % à celle des batteries conventionnelles, (voir figure 4.3a et b).

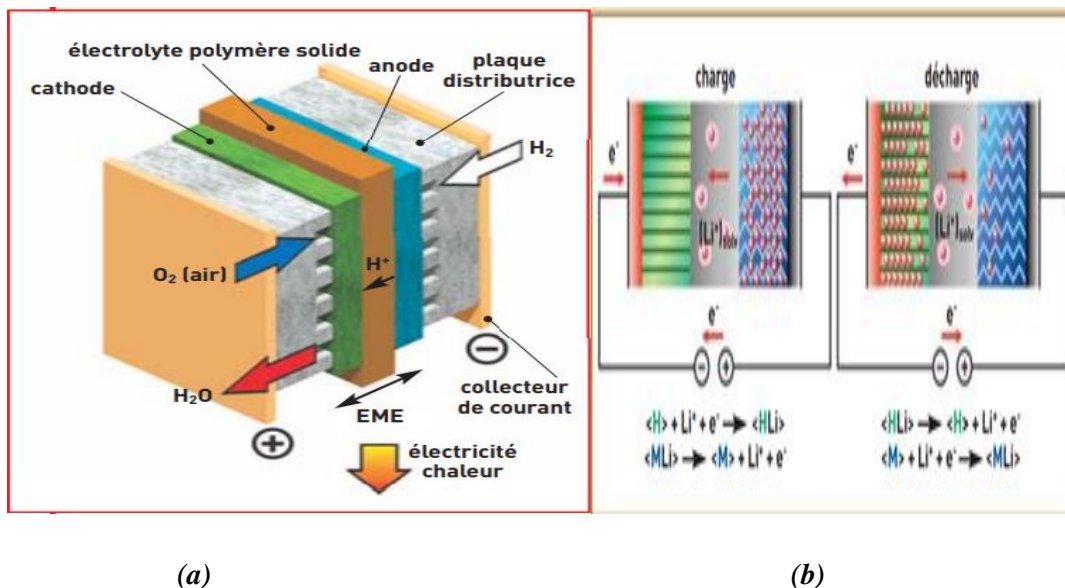


Figure V.3. Principe de fonctionnement (a) de la pile, (b) d'un accumulateur au Lithium

## V.4. Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible

### V.4.1. Les avantages de la pile à combustible:

- Les piles à combustible ne dégagent aucune émission locale (hormis de l'eau), ce qui constitue un atout de taille pour la qualité de l'air, notamment dans les centres urbains.
- Elles offrent également des rendements supérieurs à un moteur thermique (mais inférieur à une batterie),

sont silencieuses, peuvent être modulées, supportent des températures allant jusqu'à 1000°C (dans le cas des piles SOFC) et peuvent être utilisées pour des applications très variées [60].

- Haut rendement énergétique
- Ravitaillement rapide
- Fiabilité
- Absence d'émissions de GES
- Faible niveau sonore (faible vibration)
- Format compact, constituées en bloc, une superposition de plusieurs piles à combustibles uniques
- Faibles coûts de maintenance
- Longévité
- Adaptabilité aux longues portées, dans le cas de la mobilité lourde et intensive

#### V.4.2. *Les inconvénients de la pile à combustible*

- Le coût est le principal inconvénient de la pile à combustible,
- L'usage de matériaux chers et les volumes de production encore limités ne permettent pas de diminuer les prix de façon suffisante.
- La problématique de la durée de vie, jugée encore insuffisante pour des applications larges.
- Sur le volet environnemental, la question de la source énergétique doit aussi être posée. Si une pile à combustible affiche un fonctionnement « zéro émission », la source d'énergie en amont doit être évidemment prise en compte. Gris, bleu, vert... selon sa couleur,
- L'hydrogène est plus ou moins émetteur en CO<sub>2</sub>.

#### Conclusion

Les domaines d'application de la pile à combustible sont de trois ordres : l'alimentation en énergie d'appareils portables, la propulsion ou l'alimentation électrique des moyens de transport, ainsi que la production stationnaire de chaleur et d'électricité. Le privilège de l'hydrogène utilisé comme combustible est la facilité de son stockage ; il devrait donc s'imposer dans tous les domaines où une réserve continue en électricité est requise, mais difficile à réaliser. La pile à combustible devrait donc se substituer largement aux batteries traditionnelles et ouvrir de nouvelles perspectives à la génération mobile d'électricité dans le secteur des transports. Parallèlement, elle permettra une production décentralisée d'électricité et/ou de chaleur, ce qui en fait un enjeu primordial dans le contexte de la libéralisation des marchés énergétiques, mais aussi de la diversification des sources d'approvisionnement.

## *Exemples d'exercices portant sur le principe des piles à combustible*

### **William Grove - PAC:**

Le principe des piles à combustible a été découvert par l'électro chimiste William Grove en 1839, mais leur utilisation réelle ne date que des années 1960, à l'occasion des programmes spatiaux de la NASA.

Ces piles alimentaient en électricité des ordinateurs de bord des vaisseaux Gemini et Apollo et fournissaient l'eau de consommation.

En effet par comparaisons aux piles saline et alcalines, les piles à combustible, type hydrogène-oxygène, présentent deux avantages :

- Faire appel à des réactifs (dioxygène de l'air et dihydrogène) disponible, en grand quantité et
- être non polluantes car libèrent de l'eau

Le principe de fonctionnement :

La cellule de réaction est composée de deux électrodes séparées par un électrolyse (exemple: l'acide phosphorique  $H_3PO_4$ ). Elle est alimentée en dihydrogène et en continu

Le fonctionnement de la pile repose sur une réaction d'oxydoréduction au niveau des électrodes

Données:

Masse molaires atomique:  $M(H) = 1,0 \text{ g / mol}$ ;  $M(O) = 16,0 \text{ g / mol}$

Constante d'Avogadro:  $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Faraday:  $1F = 96500C. \text{ mol}^{-1}$

#### **A. Schéma de la pile à combustible**

- Quelle est la nature des porteurs de charges à l'extérieur de la pile
- Légènder le schéma de la pile en indiquant le sens conventionnel de circulation du courant électrique I et le sens de circulation des porteurs de charges à l'extérieur de la pile (en ajoutant des flèches bien orientés)

#### **B. Les couples d'oxydoréduction mis dans réaction sont**

$H^+ / H_2O$  et  $O_2 / H_2O$

- Ecrire les demi-équations électroniques pour chaque couple mis en jeu, quand la pile débite.
- En déduire l'équation de la réaction modélisant la transformation ayant lieu dans cellule de réaction

## Conclusion Générale

Les énergies renouvelables sont une source d'énergie inépuisable. Disponibles à volonté, ces sources sont diverses et variées, allant du solaire à l'éolien en passant par la géothermie. Grâce à ces énergies peu polluantes, on peut envisager un système de production énergétique prolifique plus respectueux de la nature.

De manière générale, les énergies renouvelables sont plus propres que les énergies fossiles et fissiles actuellement exploitées dans le monde entier. Elles sont plus écologiques, disponibles en masse autour du globe et sont « gratuites » une fois les installations de production rentabilisées.

Les **énergies renouvelables** permettent de rejeter moins de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère que les **énergies** fossiles, en apparence seulement. Le principal avantage des EnR, ou en tout cas celui sur lequel insiste ses défenseurs, c'est la production « décarbonée » d'électricité et de chaleur.

**L'énergie éolienne** est l'énergie propre par excellence. Sans rejet ni déchet d'aucune sorte, elle permet avec un bon coefficient de performance d'assurer une bonne indépendance énergétique. Sur terre ou off-shore, les éoliennes démontrent d'excellentes capacités de production et sont une alternative viable pour les territoires les plus reculés dont l'accès à l'électricité est difficile. L'énergie biomasse est liée à la combustion du bois. Le bois est un combustible très présent, notamment en France où il est largement implanté. Si cette énergie rejette tout de même des gaz à effet de serre, les rejets sont moindres par rapport à la quantité de CO<sub>2</sub> qu'un arbre aura absorbé au cours de sa vie. Une forêt bien gérée et renouvelée permet de ne pas épuiser les réserves en bois. La biomasse est donc une énergie qui participe au développement local tout en étant très bon marché (les granulés de bois sont les combustibles les moins chers du marché).

**L'énergie solaire** est largement préférée dans le secteur énergétique et se développe à vitesse grand. Production d'électricité grâce au photovoltaïque, mais aussi de chauffage grâce aux panneaux solaires thermiques, le solaire peut être exploité à grande échelle dans des parcs prévus à cet effet ou à petite échelle chez les particuliers. Les panneaux solaires possèdent un meilleur rendement en zone très ensoleillée comme l'Algérie. La stratégie de l'**Algérie** en la matière vise à développer une véritable industrie des **EnRs** associée à un programme de formation et de recherche ainsi que l'acquisition de l'expérience nécessaire, qui permettra, à terme, d'employer le génie local **algérien**, pour toutes les phases de développement.

## References

- [1] Sabonnadier Jean Claud. "Nouvelles technologies de l'énergie 1 : Les énergies renouvelables", Ed. Hermès.
- [2] <https://www.iter.org/fr/mach>
- [3] H.Auer. "Worldwide Emissions of CO<sub>2</sub>". Durban Conference, 2011
- [4] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie>
- [5] Rapport Energie 2011, WWF International en partenariat avec ECOFYS, OMA
- [6] <http://portail.cder.dz>
- [7] M.Chergui, "Nouvelle technique de commande et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque". Thèse doctorat 2013. Université de l'USTO-Oran.
- [8] L.Protin, S.Astier, "Convertisseurs photovoltaïques", Technique de L'Ingénieur, Ref: D 3360, 1997.
- [9] J.M.Navarro, "Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible » Thèse doctorat université de Toulouse 2008
- [10] B. Lakehal "Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky " Mémoire Magister Université de Batna. 2009
- [11] F. Lasnier, T.G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN0-85274-311-4
- [12] M. Belarbi, K. Haddouche, A. Midoun, "Modeling and simulation of photovoltaic solar panel". World Renewable Energy & Environment Conference, WREEC 2006, Libya
- [13] S. Archambeau, P. Destruel, I. Seguy, M. Oukachmih, P. Jolinat, M. Mabilia, H. Bock, "Organic photovoltaic cells based on organic discotic materials", IEEE International Symposium on 2004, Vol.2, pp. 93-96
- [14] L. M. Fraas, V. Sundaram, P. Gruenbaum, M. Kuryla, D. Pietila, and A. Thompson, "Tandem gallium concentrator solar cells: 1922 review", Eleventh European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 135-141, 1992.
- [15] S.Singer and A. Braunstein, "A maximum power transfer from a nonlinear energy source to an arbitrary load", IEEE Proceeding, Pt G, pp. 1-7, 1987.
- [16] I.Salim "Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones". Mémoire de Magister. 2006
- [17] Peser Felix A. "Installation solaires thermique : conception et mise en œuvre", Ed. Moniteur.
- [18] Gide Paul. Le grand livre de l'éolien, Ed. Moniteur.
- [19] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Energie\\_éolienne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Energie_éolienne)
- [20] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/principe-fonctionnement-eolienne/>

[21] Viollet Pierre Louis. Histoire de l'énergie hydraulique, Ed. Press ENP Chaussée.

[22] La production d'énergie d'origine renouvelable dans le monde- 2ème inventaire 2000- Ed. System solaire 146, rue de l'Université 75007 Paris (www.system solaire.com)

[23] Madet.D "Hydraulique et géothermie : principe physiques et modalité d'utilisation". Ecole d'été de physique-Caen2001 (<http://in2p3>

[24] « *L'énergie: stockage électrochimique et développement durable – L'énergie : stockage électrochimique et développement durable – Collège de France* ».