



PROJET DE FIN D'ETUDES

Filière : Sciences de la matière physique

SMP

SEMESTRE : S6

LES ENERGIES RENOUVELABLES AU MAROC

Réalisé par :

◆ **FATIMA ZAHRA AFERIAT**

◆ **SOUAD NAOUI**

◆ **SOUKAYNA ABOUABDELLAH**

Sous la direction du Professeur : Brahim AZIZE

Soutenu le : 26 juin 2015 devant le Jury :

Pr : Mhirech Abdeaziz professeur à la Faculté des Sciences de Rabat

Pr : Hassanain Najem professeur à la Faculté des Sciences de Rabat

Pr : Azize Brahim professeur à la Faculté des Sciences de Rabat

Année universitaire : 2014-2015

Remerciements

Avant d'aborder ce rapport résumant le travail réalisé au niveau de ce projet ;

Nous tenons tout d'abord à exprimer nos sincères remerciements à Mr Brahim AZIZÉ qui nous a encadrés tout au long de la période du projet.

De même, tout notre respects, notre reconnaissances et notre profondes gratitudes va à l'encontre de tous les enseignants de la Faculté des Sciences de Rabat pour leur aide précieux et leur soutient durant cette année de Formation dans laquelle nous avons acquis les bases pour que nous puissions passer ce PFE dans des conditions confortable.

Enfin, nous tenons à remercier messieurs les professeurs A. Mhirech et le professeur N. Hassanain qui ont accepté de faire party de ce jury.

Merci

Sommaire

Introduction générale.....	5
----------------------------	---

Chapitre I : Energie solaire

1. Généralité sur les énergies renouvelables :.....	6
2. <u>l'énergie solaire au Maroc:.....</u>	<u>10</u>
3. Solaire photovoltaïque :.....	12
4. Solaire thermique :.....	17
5. Les avantages et les limites de l'énergie solaire.....	21
6. Conclusion.....	22

Chapitre II : Energie éolienne

1. Le vent.....	23
2. Principe de l'énergie éolienne :.....	25
3. L'éolienne verticale.....	27
4. L'éolienne horizontale.....	30
5. L'énergie éolienne au Maroc.....	34
6. Energie fournie par le vent.....	35
7. Puissance du vent.....	35
8. La limite de Betz.....	36
9. Coefficient de puissance maximale	37

10. Rendement globale d'un aérogénérateur.....	38
11. Puissance d'une éolienne.....	39
12. Le potentiel éolien.....	40
13. Les projets éoliens du Maroc :.....	40
14. Conclusion.....	41

Chapitre III : Énergie hydraulique et biomasse

1. Energie hydraulique.....	42
2. La biomasse	52
Conclusion générale.....	58
Références.....	59

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont associées aux forces de la nature, comme le soleil qui est le pourvoyeur essentiel de l'énergie consommée par l'humanité. En effet la chaleur dégagée par le bois n'est qu'un condensat d'énergie solaire emmagasinée pendant des millénaires. Les générateurs d'électricité des barrages tournent grâce à l'énergie hydraulique fournie par l'évaporation de l'eau dû à la chaleur du soleil, et que les éoliennes ne tournent que par la suite du chauffage solaire de l'atmosphère qui engendre les vents.

Le Maroc dépend de l'extérieur pour son provisionnement en énergie à hauteur de 96% cela aggrave énormément le déficit commercial et pénalise les entreprises nationales, c'est pour cela qu'il prend désormais conscience de l'importance des énergies renouvelables, d'autant plus qu'il dispose d'un potentiel considérable, essentiellement en énergie solaire et éolienne.

Cet intérêt aux énergies renouvelables permet de réduire la dépendance énergétique fossile et de lutter contre la pollution de l'air.

L'objectif de ce mémoire est d'expliquer l'origine des énergies renouvelables et les principes de leurs fonctionnement, et d'exposer les principaux sites qui sont exploités au Maroc.

Le premier chapitre de ce travail est consacré à l'énergie solaire, l'importance du soleil dans notre vie, les différentes énergies solaires à savoir le photovoltaïque et le thermique ; le second chapitre est dédié aux énergies éoliennes, l'origine du vent, les différentes sortes d'éoliennes et la limite théorique de leurs puissances.

Le troisième chapitre est consacré aux énergies hydrauliques et à la biomasse. Et à la fin une conclusion générale.

Chapitre I : Energie solaire

1. Généralité sur les énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui se constitue ou se reconstitue plus rapidement qu'elle n'est utilisée. Ce sont des énergies primaires inépuisables à très long terme, car elles sont issues directement de phénomènes naturels, réguliers ou constants, liés à l'énergie du soleil, de la terre ou de la gravitation. Les énergies renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émissions de CO₂, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles. La disponibilité à l'infini de ces énergies n'a de sens qu'à l'échelle humaine. En effet, il ne faut jamais perdre de vue que l'énergie, quelle que soit sa forme, est un contenu propre à une substance ou à un système, et que toute utilisation d'énergie revient à l'en retirer irrémédiablement. D'autre part, si une partie de l'énergie consommée a effectivement servi, le reste est le plus souvent perdu et se retrouve dans l'environnement.

Ainsi, l'énergie solaire est inépuisable à l'échelle des temps humains, de même que les énergies qui en dérivent : l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse produite par photosynthèse et une partie des énergies marines. Il en est de même pour l'énergie due à la gravité (énergie marémotrice) ou à la géodynamique interne (énergie géothermique). (1)

Il existe plusieurs types d'énergie renouvelable :

- **Energie solaire**
- **Energie éolienne**
- **La biomasse**
- **Les hydrauliques**
- **Géothermique**

Le monde entier commence à prendre conscience de l'importance des énergies renouvelables (ER), qui sont devenues une priorité pour l'avenir. Le Maroc n'y fait pas exception, surtout qu'il dispose d'un grand potentiel en ER, essentiellement en énergie solaire. C'est pour cette raison qu'un grand engouement pour la promotion des ER se fait sentir depuis quelques années au Maroc.

L'intérêt que le pays porte au développement des énergies vertes procède de sa volonté de réduire sa dépendance des ressources énergétiques fossiles et de contribuer à la lutte contre les changements climatiques

a. Le soleil

Le soleil est une étoile parfaitement standard comme des milliards d'autres étoiles dont est constituée l'univers, c'est l'étoile la plus proche de la Terre de type « G2 » signifie qu'il est plus chaude (5 780 kelvins en surface) et plus brillante que la moyenne. Son importance pour nous c'est qu'il est à la base de la vie sur Terre.

Le Soleil nous procure de l'énergie sans laquelle aucune vie sur Terre ne serait possible. Il est constituée de gaz extrêmement chauds, les éléments qui les composent sont bien connus sur notre planète : hélium, hydrogène, calcium, sodium, magnésium, fer avec des proportions différentes

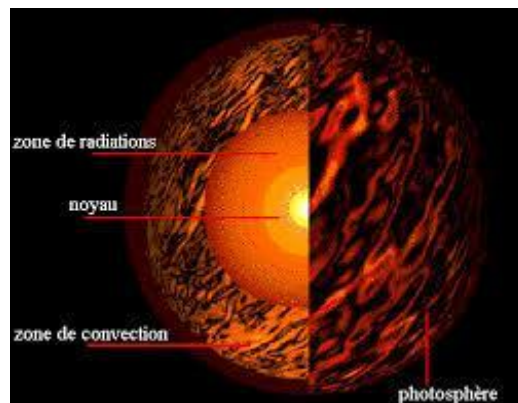


Figure 1 : structure de soleil

Quelques caractéristiques :

- Diamètre : environ 1,4 millions de kilomètres,
- Distance : 150 millions de km de la terre,
- Masse : 300 000 fois la masse de la Terre,

- Age : 4,5 milliards d'années,
- Température de surface : 5780 Kelvin,
- Température interne : plusieurs millions de Kelvin

Les différents Type de rayonnements Solaire

- **Le rayonnement direct** : Ce sont les rayons UV du Soleil. C'est ce type de rayonnement qui est utilisé dans les systèmes à concentration (four solaire, centrales solaires thermodynamique et photovoltaïque).

- **Le rayonnement diffus** : Ce sont des rayons qui proviennent de l'atmosphère, qu'il fasse beau ou pas. Des rayons lumineux issus du Soleil traversent les nuages et se diffusent sur toute la surface de la Terre. Il contribue à l'éclairement mais ne peut pas être concentré (à l'inverse du rayonnement direct).

- **Le rayonnement global** : C'est la somme du rayonnement direct et diffus. C'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques (systèmes sans concentration). [1]

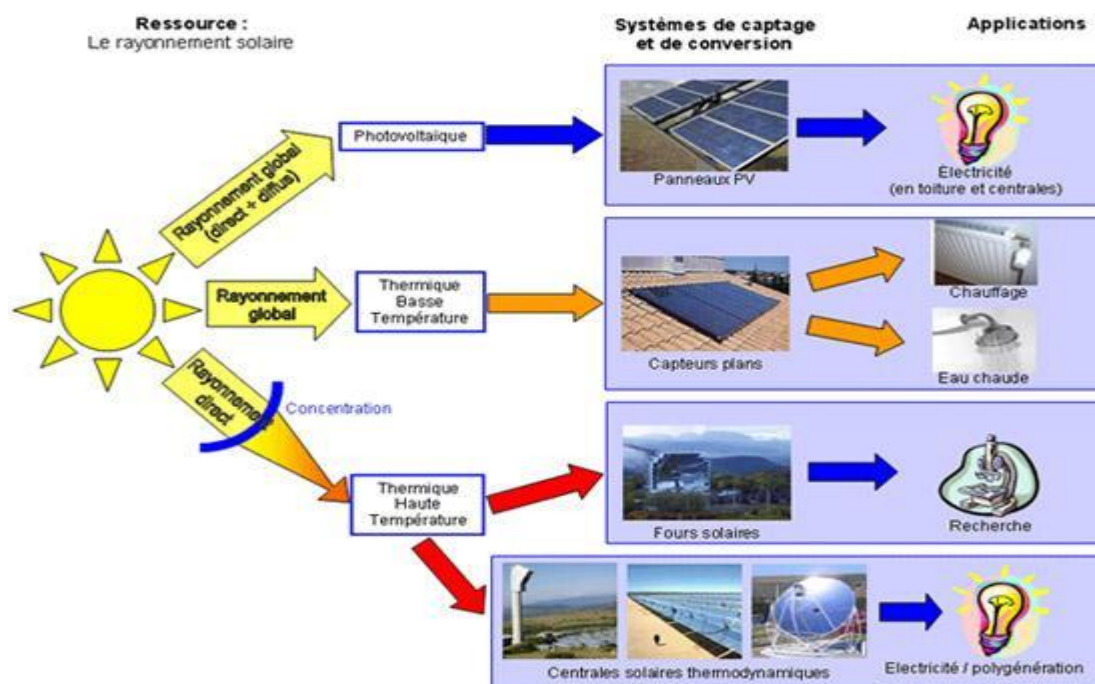


Figure 2 : Formes de l'énergie solaire

b. Nature du rayonnement :

i. Rayonnement électromagnétique :

On appelle ainsi tout rayonnement provoqué par une excitation quelconque de la matière.

Sa vitesse est : dans le vide $c = 299\,850\text{ km/s}$, dans un milieu d'indice n , $v = c/n$.

Le rayonnement électromagnétique est constitué de radiations monochromatiques caractérisées par une longueur d'onde λ ou fréquence ν tel que : $\nu = \lambda \cdot \nu$.

ii. Rayonnement thermique :

Correspond à l'émission due à une augmentation de température d'un corps composé de radiations de longueurs d'ondes $0,1\text{ }\mu\text{m} \leq \lambda \leq 100\text{ }\mu\text{m}$

Le spectre solaire, en dehors de la couche atmosphérique, se répartit sur une bande allant de $0,2$ à $25\text{ }\mu\text{m}$, avec des radiations supplémentaires :

- l'UV extrême de longueur d'onde $\lambda = 0,1216\text{ }\mu\text{m}$
- les rayons X de longueur d'onde $0,005\text{ nm} \leq \lambda \leq 1\text{ nm}$
- les rayons radioélectriques de longueur d'onde $10 \leq \lambda \leq 100\text{ cm}$

L'énergie de ces radiations est inférieure à 10^{-5} de l'ensemble du rayonnement solaire.

iii. Rayonnement solaire :

Situé à environs 150 millions de kilomètres de notre planète le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il recouvre une gamme assez large de longueurs d'onde, depuis les ondes radio (grande longueur d'onde) jusqu'aux rayons X (petite longueur d'onde). Il présente un maximum vers 410 nm .

L'œil humain n'est cependant sensible qu'à une petite partie du spectre solaire : le rayonnement visible est compris entre 400 et 800 nm (du violet au rouge).[1]

Une partie du rayonnement émis parvient jusqu'à la Terre, où des ondes sont réfléchies par l'ionosphère et l'atmosphère (les ondes décimétriques et certains rayons ultraviolets), tandis que d'autres arrivent à la surface des nuages, des océans ou des continents.

Elles vont alors être plus ou moins réfléchies selon l'albédo de la surface frappée. Celles qui ne le sont pas sont alors absorbées sous forme de chaleur ou exploitées par des organismes vivants, comme les végétaux par photosynthèse.

Le rayonnement solaire apporté par le soleil donne à la Terre de la chaleur et de la lumière. Ce rayonnement peut être capté par un panneau solaire thermique qui produira de l'eau chaude ou par un panneau photovoltaïque qui fournira de l'électricité. [2]



Figure 3 : Rayonnement Solaire

2. l'énergie solaire au Maroc:

a. Définition de l'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables .

L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'Homme pour s'éclairer, se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques.

Indirectement, l'énergie solaire est aussi la source de la plupart des énergies renouvelables et des hydrocarbures fossiles. Elle est en effet responsable de la mise en mouvement des masses d'eau (énergies marines) et d'air (énergie éolienne), du cycle de l'eau (énergie hydraulique) et de la photosynthèse (biomasse et hydrocarbures). Seuls trois types d'énergie ne dérivent pas de l'énergie solaire :

- l'énergie marémotrice ;
- l'énergie géothermique ;
- l'énergie nucléaire.

Le potentiel de cette source d'énergie est donc immense. [3]

Deux systèmes solaires sont actuellement utilisés : le solaire thermique et le solaire photovoltaïque.

b. Le parc solaire de Ouarzazate :

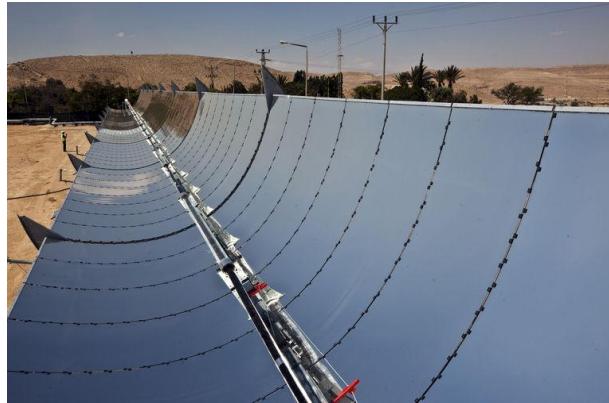


Figure 3 : Parc solaire

Après le plus grand parc éolien d'Afrique inauguré fin 2014 à Tarfaya (sud-ouest), le Maroc poursuit son ambitieux plan de développement des énergies renouvelables. Prochain projet : le parc solaire de Ouarzazate, le « *plus grand au monde* ».

C'est un consortium majoritairement saoudien, emmené par Acwa Power, qui vient de remporter l'appel d'offres pour la seconde phase de ce projet d'ampleur. Avec son partenaire espagnol Sener, ce groupe, détenu par huit conglomérats saoudiens, avait déjà été retenu en 2012 pour la construction de la première centrale thermo-solaire d'Ouarzazate baptisée « *Noor I* ». Cette première phase d'un projet titanesque devrait être achevée en octobre 2015.

Pour un montant évalué à près de 2 milliards d'euros, ils réaliseront et exploiteront « *Noor II* » et « *Noor III* » d'une capacité respective de 200 et 150 mégawatts. Pour ce projet, le Maroc jouit du soutien de bailleurs de fonds tels que la banque publique allemande Kfw (650 millions d'euros) et de la Banque mondiale (400 millions d'euros).

En tout, le parc d'Ouarzazate jouira d'une capacité de 560 mégawatts. A compter de 2020, Rabat entend hisser sa production solaire à 2 000 mégawatts. Une manière de compenser, avec les énergies renouvelables, son absence d'hydrocarbures. En tout, le Maroc table sur une enveloppe de près de 11 millions d'euros. [4]

«...il faudrait susciter une forte adhésion en faveur de la mise en œuvre de la stratégie d'efficacité énergétique, notamment à travers le développement des énergies renouvelables et propres... » Extrait de discours de SM le Roi à la nation à l'occasion de la fête du Trône-Tétouan (30/07/2010)

Le Maroc bénéficie d'un gisement solaire considérable d'une capacité de 20 000 MW, avec plus de 3 000 h/an d'ensoleillement. Capitalisant sur cet atout, le Maroc a lancé, en novembre 2009, un programme intégré et volontariste de production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Ce programme a pour objectifs :

- d'optimiser le mix énergétique tout en réduisant la dépendance aux importations d'énergie primaire ;
- de satisfaire une demande domestique croissante ;
- d'encourager le déploiement d'une industrie locale sur le secteur des énergies renouvelables ;
- d'assurer la promotion de la recherche et développement et de la formation liées à ces activités ;
- d'établir le Maroc en tant que premier développeur nord-africain de production solaire à grande échelle ;
- et de minimiser les émissions de carbone, Le programme intégré d'Energie Solaire, d'un coût global estimé à 9 milliards de dollars, vise l'installation d'une capacité totale de 2 000 MW, en puissance solaire connectée au réseau (centrales solaires), répartie sur 5 sites d'ici 2020. La mise en place de ces centrales permettra d'économiser un million de tonnes équivalent pétrole et d'éviter l'émission de plus de 3,5 millions de tonnes de dioxyde de carbone par an

Le programme intégré d'Energie Solaire est ainsi en phase avec la tendance internationale, qui face à une demande énergétique croissante et au défi du réchauffement climatique, place les énergies renouvelables et particulièrement l'énergie solaire au rang de ses priorités.

Le Maroc entend devenir ainsi un acteur de référence dans le solaire. [5]

3. solaire photovoltaïque

a. Définition

Découvert par Becquerel en 1839, l'effet photovoltaïque consiste en la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Les photons frappent un matériau semi-conducteur (silicium) contenu dans les capteurs solaires, ce qui permet l'émission d'un courant électrique. Les **cellules photovoltaïques** ou photopiles sont connectées en série et en parallèle.

La **performance des installations** dépend notamment de l'ensoleillement, de l'inclinaison du toit et de la surface de l'installation. Le courant électrique continu produit par les **capteurs photovoltaïques**, transformé par un onduleur photovoltaïque en courant alternatif, passe par le compteur de production. Il est alors envoyé vers un réseau de distribution géré par ONE. [6]

La matière première du photovoltaïque est le silicium. Ajoutons à cela :

- des cellules
- des panneaux photovoltaïques (un système de montage)
- des câbles
- un onduleur
- un compteur

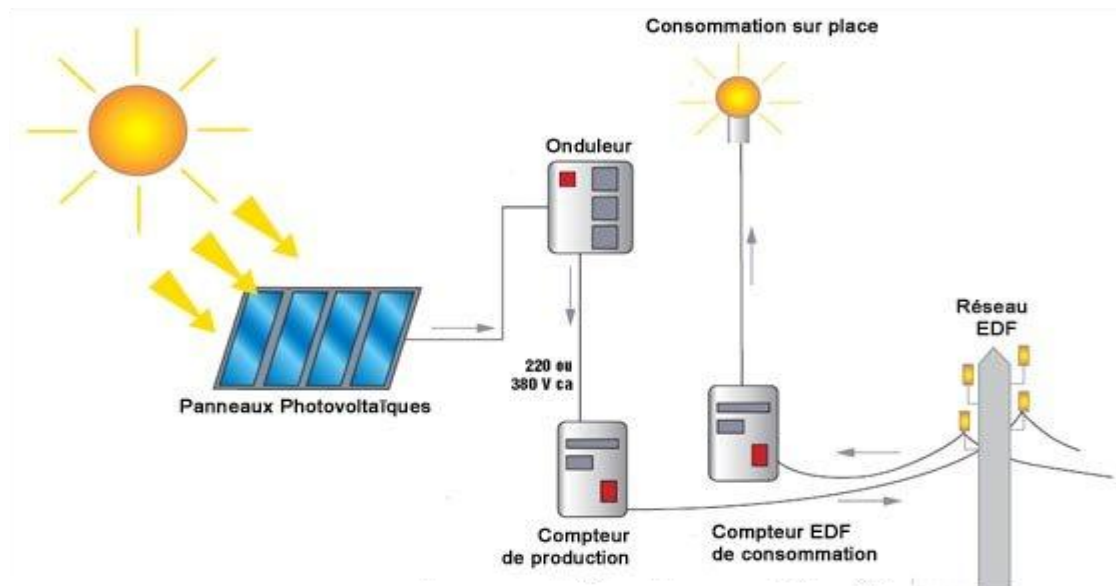


Figure 4 : Schéma d'une installation photovoltaïque connectée au réseau

b. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

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

Le fonctionnement d'une cellule **photovoltaïque** est le suivant : les photons, en pénétrant très légèrement dans le silicium, déplacent quelques électrons du métal.

Le métal semi-conducteur ne permettant le déplacement des électrons que dans un sens, les électrons déplacés par la lumière doivent passer par le circuit extérieur pour revenir à leur place, ce qui engendre un courant.

Les cellules produisent de l'électricité chaque jour même si le ciel est nuageux : dans ce cas, le rendement est simplement moins élevé. Les cellules sont assemblées sous forme de panneaux photovoltaïques, panneaux qui sont encastrés sur ou dans la toiture des habitations.

La fabrication complexe demande une excellente maîtrise technique pour assurer dans la durée le meilleur rendement.

L'assemblage de ces cellules solaires reliées les unes aux autres forme un module solaire (panneau solaire ou panneau photovoltaïque).

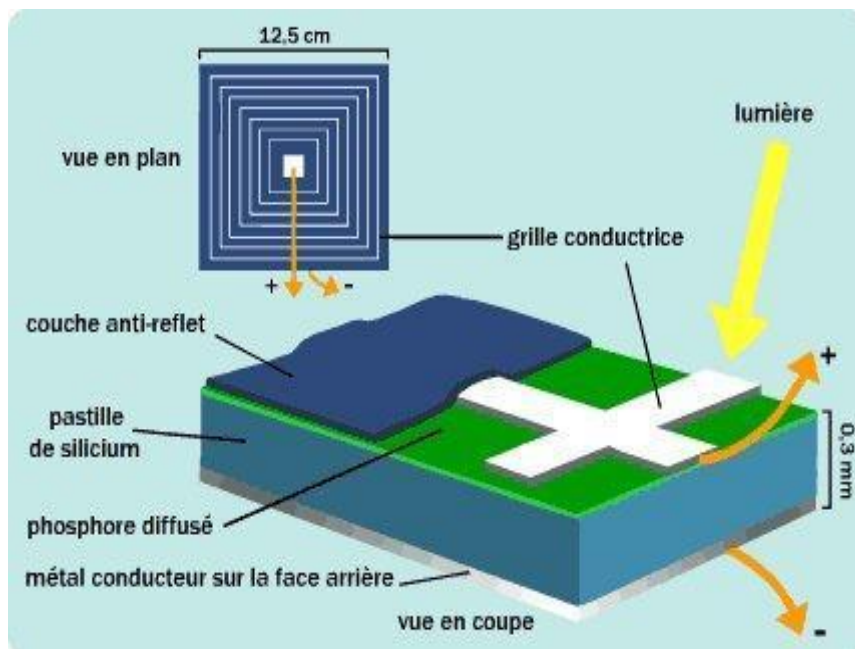


Figure 5 : cellule photovoltaïque

- **Différent type de cellule photovoltaïque :**

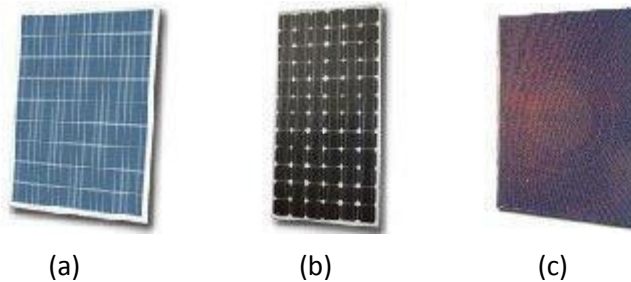


Figure 6 : différents types des cellules photovoltaïques

Le silicium utilisé en photovoltaïque peut se rencontrer sous trois formes:

cellule en silicium poly-cristallin (a) : il s'agit du matériau photovoltaïque le plus utilisé (à lui seul plus de 50% du marché mondial). Il offre un bon rendement (de 12% à 14 %) pour des coûts de fabrication maîtrisés.

cellule en silicium mono cristallin (b) : le rendement de ce matériau photovoltaïque (15 % à 17 %) est légèrement supérieur au silicium poly-cristallin, en revanche sa fabrication est plus délicate donc plus coûteuse.

cellule en silicium amorphe (c) : le rendement de ce matériau photovoltaïque est bien inférieur à ceux des siliciums cristallins (6%) et son coût est proportionnellement inférieur.

Pour ces trois matériaux photovoltaïques, les coûts par unité puissance sont identiques mais les surfaces de capteur nécessaires pour atteindre cette unité de surface varient en fonction du rendement. Les matériaux en silicium cristallin (poly et mono) représentent 90% du marché mondial.

c. Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque :

Un panneau photovoltaïque est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques.

Parfois, les panneaux sont aussi appelés modules photovoltaïques, formées d'un matériau semi-conducteur en deux couches, l'une dopée positivement (P) et l'autre négativement (N).

C'est une jonction PN. Lorsqu'un électron est arraché, il se forme à la place un « trou », se comportant comme une charge positive.

L'électron et le trou s'échappent de part et d'autre de cette jonction PN (les électrons vers N et les trous vers P), créant une différence de potentiel. Une cellule photovoltaïque produit ainsi du courant électrique continu. Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site, on obtient un champ photovoltaïque

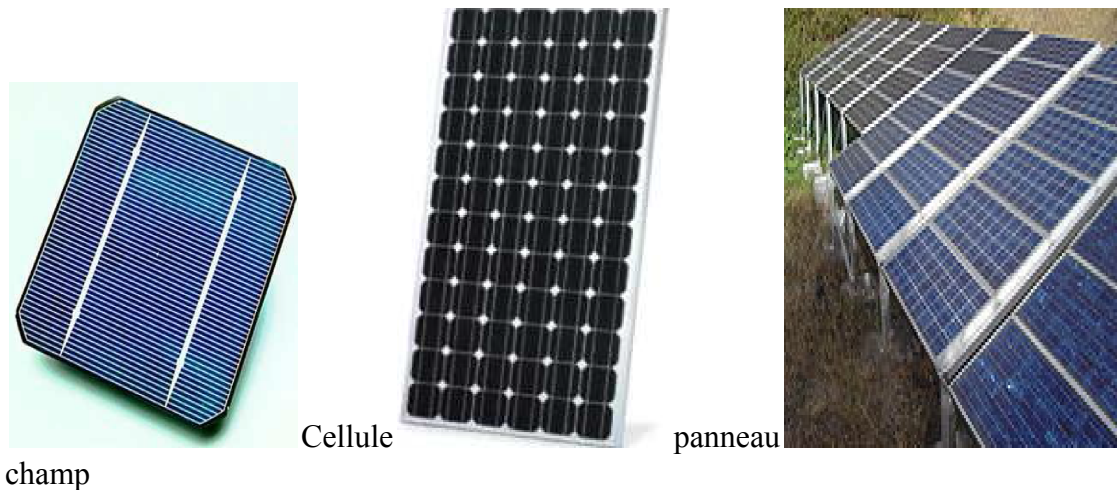


Figure 7 : champ photovoltaïque

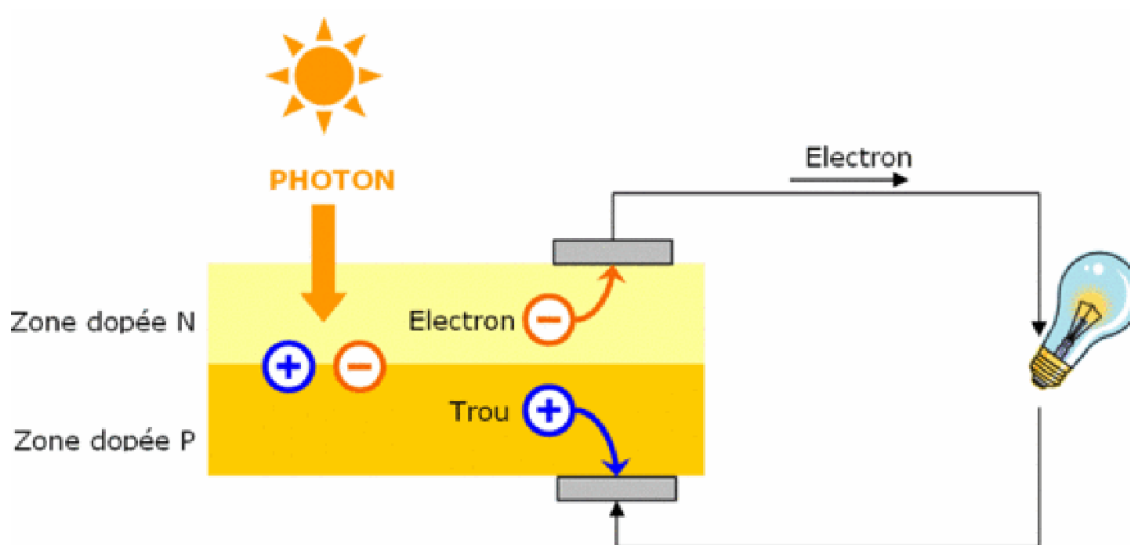


Figure 8 : panneau photovoltaïque [7]

d. L'onduleur :

L'onduleur a pour rôle de convertir le courant continu fourni par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif synchronisé avec le réseau. Appareil de haute

technologie gérée par microprocesseur, il garantit que le courant produit répond aux normes fixées par le gestionnaire du réseau de distribution. Il se présente sous la forme d'un gros boîtier métallique. Il en existe de différentes puissances et certains sont spécialement conçus pour les applications photovoltaïques. L'onduleur possède également une fonction de découplage du réseau qui empêche les surtensions dont les effets peuvent être désastreux pour les appareils électriques. Il est généralement placé le plus près possible des panneaux photovoltaïques (souvent dans le grenier) pour éviter que des câbles en courant continu parcourent la maison (pour des raisons de sécurité et pour minimiser les pertes électriques).[8]

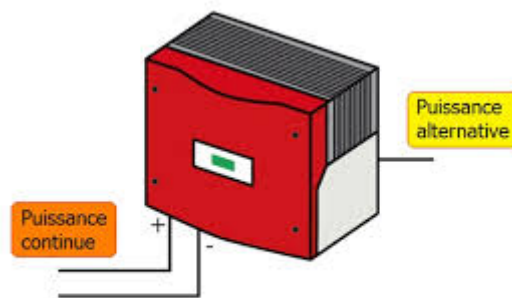


Figure 9 : Onduleur [9]

4. Solaire thermique :

a. Définition

L'énergie solaire thermique désigne la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique, soit directement (pour chauffer un bâtiment) soit indirectement (dans le cas de la vapeur d'eau pour fabriquer de l'électricité via des alternateurs). Le solaire thermique utilise en fait la chaleur transmise par rayonnement et non le rayonnement lui-même. Les deux techniques possibles consistent soit à capter l'énergie des rayons solaires grâce à un corps noir, soit à concentrer par un four solaire le rayonnement solaire en un point précis. Dans le cas du four solaire, il s'agit de concentrer l'énergie du soleil pour atteindre des températures élevées (plusieurs centaines à plusieurs milliers de degrés), ce qui permet la production électrique grâce à des turbines à vapeur ou autres moteurs thermiques. Cette technologie, dite « à concentration » utilise le rayonnement direct du soleil, et nécessite donc un emplacement avec un fort ensoleillement. [10]

L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications :

- La production d'eau chaude,

- Le chauffage des maisons,
- Le chauffage de l'eau des piscines,
- Le séchage des récoltes
- La réfrigération par absorption pour les bâtiments,
- La production de très haute température. [11]

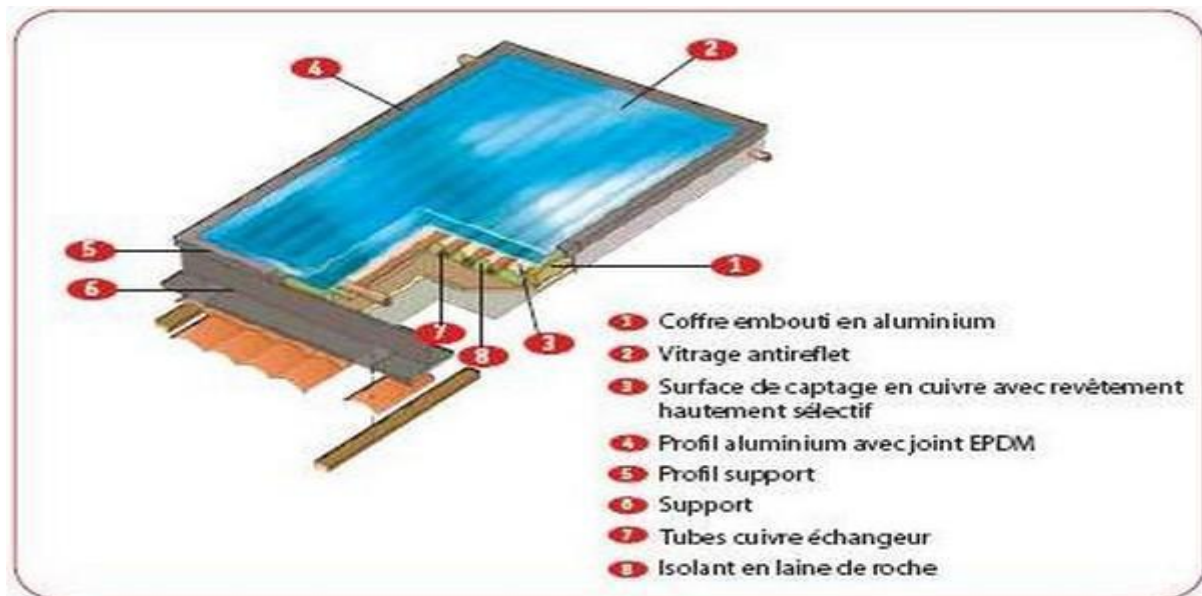


Figure 10 : Structure d'un capteur solaire thermique [12]

b. Fonctionnement de l'énergie solaire thermique

Voici un schéma explicatif du mode de fonctionnement d'un Chauffe Eau Solaire Individuel, fonctionnant à l'énergie solaire thermique :

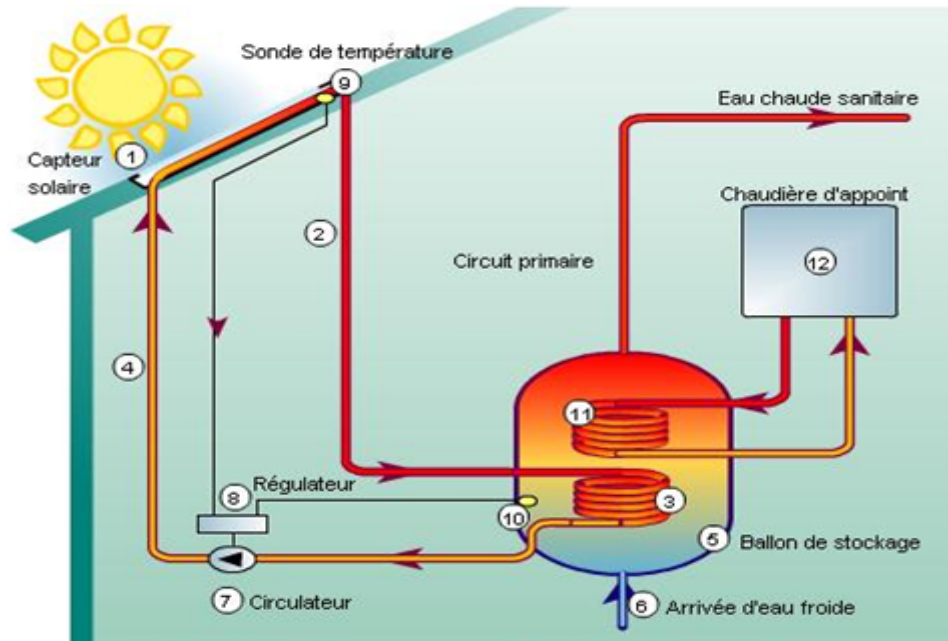


Figure 11 : Chauffe-eau solaire à éléments séparé avec chauffage d'appoint

i. Captage du rayonnement solaire :

Celui-ci s'effectue à travers le module solaire (1) (généralement disposé sur le toit de l'habitation). Il est constitué d'un absorbeur (une plaque et des tubes métalliques noirs). C'est le cœur du système solaire qui reçoit le rayonnement solaire et s'échauffe

Autour de cet absorbeur, on retrouve un coffre rigide. Celui-ci a pour but d'isoler thermiquement l'absorbeur tout en laissant passer, sur sa partie supérieure, le rayonnement solaire grâce à une partie vitrée. Une fois le rayonnement entré, ce coffre a pour but de retenir la chaleur afin de chauffer le liquide passant dans l'absorbeur.

ii. Transport de la chaleur

C'est le rôle du circuit primaire (2), contenant un fluide caloporteur (qui transporte de l'énergie) antigel. Le circuit primaire est un circuit fermé, qui ne se mélange pas avec l'eau chaude sanitaire produite. Ce fluide chaud, se dirige vers le ballon de stockage (5) afin de restituer sa chaleur à l'eau froide.

iii. Échange de chaleur

Le fluide caloporteur contenu dans les tuyaux du circuit primaire, restitue sa chaleur à l'eau froide qui remplit le ballon de stockage. Le fluide passe au travers d'un échangeur thermique (3) placé au centre du ballon, dans l'eau froide. Celui-ci va dissiper la chaleur qu'il

contient afin de réchauffer l'eau froide. Une fois la chaleur dissipée, le fluide continue son circuit et repart, grâce au circulateur (7) le mettant en mouvement, dans le module solaire, afin de se recharger en chaleur.

iv. Stockage

Le ballon de stockage est similaire, en apparence, à une chauffe eau classique. Il constitue la réserve en eau chaude sanitaire. Lorsque de l'eau est puisée dans le chauffage en solaire individuel, elle est immédiatement remplacée par de l'eau froide qui sera ensuite réchauffée.

Lors de conditions météorologiques défavorables, l'énergie solaire ne peut plus assurer la totalité de la production d'eau chaude. Les ballons d'eau chaude solaire sont équipés d'un dispositif d'appoint. Celui-ci prend le relais en cas de besoins, et vient chauffer l'eau chaude en remplacement de l'énergie solaire. En général, il s'agit d'un appoint électrique, grâce à une résistance souvent placée à mi-hauteur du ballon solaire. Mais ce peut être aussi un appoint hydraulique (avec un fluide caloporteur aussi). Raccordé à une chaudière(12) au fioul, au gaz ou une pompe à chaleur par exemple, le fluide vient libérer sa chaleur dans le ballon de stockage grâce à un serpentin. Un second ballon pourvu d'un réchauffeur électrique peut également servir d'appoint.

c. Les types d'énergies solaires thermiques

On distingue deux types d'énergies solaires thermiques :

i. La technologie solaire thermique à basse température

- **La technologie solaire «active»** : traditionnellement, ce terme désigne les applications à basse et moyenne température. Des capteurs solaires thermiques sont installés sur les toits des bâtiments. Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du Soleil et la transmettre à un fluide caloporteur. La chaleur est ensuite utilisée afin de produire de l'eau chaude sanitaire ou bien encore chauffer des locaux.
- **La technologie solaire «passive»** : toujours dans le domaine de la basse température, on peut également citer les installations solaires passives. Par opposition aux applications précédentes, celles-ci ne requièrent pas de composants dits actifs (les capteurs solaires). Ces applications reposent sur des concepts de génie civil et climatique impliquant une architecture adaptée et l'emploi de matériaux spéciaux.

L'utilisation passive de l'énergie du Soleil permet de chauffer, d'éclairer ou de climatiser des locaux.

ii. La technologie solaire thermique à haute température

- **La technologie solaire concentrée ou « thermodynamique »** : ce procédé fournit de la chaleur haute température (de 250 à 1000°C) par concentration du rayonnement solaire. Ce pouvoir calorifique est utilisé pour actionner des turbines à gaz ou à vapeur afin de produire de l'électricité.



Figure 12 : tour solaire

- La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente elle-même un générateur qui produit de l'électricité, c'est l'héliothermodynamie.

Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration :

- Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole.
- Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.
- Troisième technologie : des capteurs cylindro-paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire. [13]

5. Les avantages et les limites de l'énergie solaire

- L'énergie solaire est renouvelable, disponible gratuitement et disponible en quantités colossales à l'échelle humaine. De plus, et contrairement à sa variante thermodynamique, l'énergie thermique classique peut être utilisée dans les régions d'ensoleillement moyen.
- En phase d'exploitation, le processus de production de l'énergie thermique n'a pas d'impact sur l'environnement. Il n'y a pas de rejets polluants ou de déchets.
- Les technologies de solaire thermique directe et indirecte sont simples et relativement peu coûteuses. Ce sont des technologies matures d'ores et déjà disponibles sur le marché.
- Il est possible de stocker temporairement la chaleur créée et de les restituer plus tard, pendant la nuit par exemple.
- Les installations thermiques sont adaptées à la majorité des contextes domestiques. C'est-à-dire qu'il est possible de valoriser la chaleur du rayonnement solaire dans tous les lieux, mêmes isolés, à partir du moment où celui-ci est suffisant.
- La production de chaleur est tributaire des saisons et des climats. De plus, des capacités de chauffage d'appoint restent nécessaires.
- Les technologies thermique à faible température ne produisent pas d'électricité, et ne peuvent par conséquent pas répondre à ces besoins (mais peuvent satisfaire des besoins de chaleur). [14]

6. Conclusion

L'énergie solaire est une source d'énergie propre disponible dans presque tous les endroits du monde et aussi longtemps que le soleil brillera. L'énergie solaire est produite par des cellules photovoltaïques qui captent l'énergie du soleil et la convertisse en électricité. L'énergie solaire est une énergie attrayante parce que la technologie photovoltaïque ne produit aucune pollution, a une durée de vie de vingt ans et nécessite peu d'entretien. À ce titre, l'énergie solaire est de plus en plus considérée comme une solution à long terme pour lutter contre le réchauffement de la planète.

Chapitre II : l'énergie éolienne

Dans le cadre de sa stratégie énergétique, le Maroc s'engage dans un vaste programme éolien, pour accompagner le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique dans le pays. Le Projet Marocain Intégré de l'Energie Eolienne, s'étalant sur une période de 10 ans pour un investissement total estimé à 31,5 milliards de dirhams, permettra au pays de porter la puissance électrique installée, d'origine éolienne, de 280 MW en 2010 à 2000 MW à l'horizon 2020.

1. Le vent

a. Définition

Le vent est un déplacement d'air au sein de l'atmosphère, tout comme la pression atmosphérique, l'hygrométrie et la température, il tient une place très importante dans les phénomènes météorologiques.

De la simple brise rafraîchissante en été, il peut devenir dévastateur comme le cas avec les tempêtes ou avec les ouragans et les tornades

b. Composition et formation

L'air est composé de molécules de gaz qui se déplacent sans cesse. Lorsque la pression est plus forte, dans un anticyclone par exemple, c'est qu'il y a plus de molécules de gaz. Les

molécules se déplacent de l'endroit où il y a plus de molécules vers l'endroit où il y a moins de molécules, afin de rétablir l'équilibre.

C'est de cette façon que se crée la force de pression (plus précisément "du gradient de pression").

Le vent est donc un déplacement d'air, produit par la force du gradient de pression ; soit un déplacement de l'air à partir des zones de haute pression (Anticyclone) vers les zones de basse pression (dépression).

Le vent, ne souffle pas tout droit, mais suit un chemin qui se développe en spirales à cause de grands mouvements d'air guidés par la force de Coriolis, en raison de la rotation de la Terre.

La différence de température entre 2 points sur le globe crée aussi un déplacement d'air, pour les mêmes raisons citées au-dessus. C'est le cas de la brise de terre ou de mer...

La nuit c'est le contraire qui se produit l'air se refroidit plus vite en altitude que dans la vallée et l'air se déplace des sommets vers les vallées. Le même phénomène se produit sur les côtes, où la terre se réchauffe plus vite que la mer, aussi le matin la brise marine se lève venant de la mer, en direction de la terre plus chaude et la situation s'inverse la nuit, la mer mettant plus longtemps à se refroidir que la terre.

c. La force du vent :

La force du vent est due à la différence de pression atmosphérique, aussi plus les isobares (lignes d'égale pression) sont resserrées, plus le vent est fort.

Les isobares sont espacées de 5hpa, dans cette situation le gradient est fort car l'espacement des isobares se fait sur une courte distance 2° géographique soit environ 200 Km cela provoque donc des vents de plus de 100 km/h. Par comparaison pour un vent moyen de 45 km/h les isobares de 5hPa, sont espacées de 550 km.

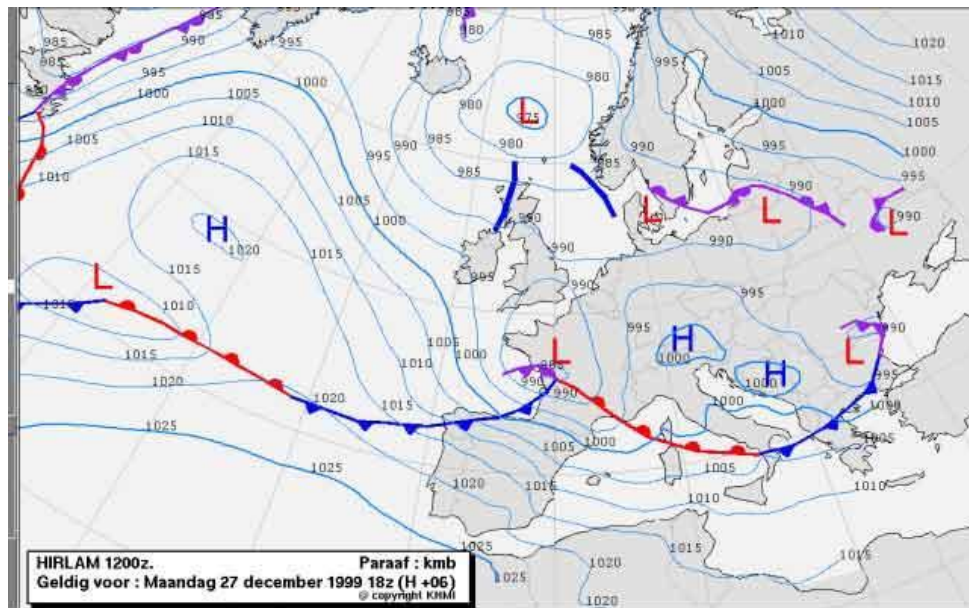


Figure 13 : la force du vent à différente pression(19)

d. Mesure du vent :

i. L'anémomètre :

Pour mesurer la vitesse du vent on se sert d'un anémomètre : Cet instrument se compose de 3 petites coupelles hémisphériques, disposées à l'extrémité de bras métalliques espacés de 120°. Un compteur relié à l'axe de rotation permet de lire la vitesse et de l'enregistrer suivant les modèles.(15)



Figure 14 : anémomètre(19)

ii. Les manches à air

Utilisé dans l'aéronautique pour que les pilotes repèrent la vitesse du vent, les manches à air sont les instruments météorologiques les plus rentables (parce que peu coûteux) ; Si le

manche est déployé , la vitesse du vent est de 50 km / h ; par contre, si le manche à air est entièrement déployé, la vitesse du vent peut dépassée facilement les 90 km / h

iii. La sonde

Envoyé dans le ciel pour mesurer la vitesse du vent (ainsi que d'autres paramètres météorologiques) par l'intermédiaire d'un ballon gonflé à l'hélium.

2. Principe de l'énergie éolienne :

a. Définition

L'énergie éolienne est une énergie produite à partir de la force du vent sur les pales d'une éolienne. Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur les pales des hélices induisent la mise en rotation du rotor. L'énergie électrique ainsi produite peut être distribuée sur le réseau électrique grâce à un transformateur.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- **la transformation en énergie mécanique :**

Le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;

- **la 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 bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation. (19)

b. Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne

- Les éoliennes terrestres dites « on shore » sont installées sur la terre.
- Les éoliennes dites « offshore » sont installées en mer.

On distingue par ailleurs deux typologies d'installations :

- Industrielle : les grands parcs éoliens (fermes éoliennes) raccordés au réseau électrique ;
- Domestique : des petites éoliennes installées chez les particuliers.

c. Fonctionnement technique

L'énergie électrique ou mécanique produite par une éolienne dépend de trois paramètres : la forme et la longueur des pales, la vitesse du vent et enfin la température qui influe sur la densité de l'air.

L'énergie récupérable correspond à l'énergie cinétique qu'il est possible d'extraire. Elle est proportionnelle à la surface balayée par le rotor et au cube de la vitesse du vent.

En pratique, si la pale est deux fois plus grande l'éolienne produit huit fois plus d'énergie. Si la vitesse du vent double la densité de l'air entre également en jeu : une éolienne produit 3% de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est plus froid de 10°C. La puissance éolienne dépend principalement de l'intensité du vent et de ses variations. L'énergie éolienne est donc une énergie intermittente et aléatoire.

L'ensemble pale/rotor est orienté face au vent par un système de gouvernail. La plupart des éoliennes démarre lorsque la vitesse du vent atteint environ 3 m/s et s'arrête lorsque cette vitesse atteint 25 m/s. Généralement, les éoliennes sont paramétrées afin d'exploiter au mieux les vents de puissance intermédiaire.

3. L'éolienne verticale

a. Définition

Les éoliennes verticales, plus rares que les éoliennes horizontales, sont pourtant les premières à avoir été utilisées car leur conception est plus simple que les éoliennes horizontales. Elles sont efficaces en milieu urbain et en cas de vents forts, mais leur mauvais rendement constitue un frein majeur à leur développement.

Les pales de l'éolienne verticale tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique. Elle peut capter des vents plus faibles ce qui lui permet d'être plus fréquemment exploitée. Elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale. Elle

s'adapte donc mieux aux bâtiments. Elle peut fonctionner quel que soit le sens du vent. Par contre, elle produit moins d'électricité que l'éolienne horizontale. (17)

b. Principe d'éolienne verticale

Les pales de l'éolienne verticale, tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique. Cette solution est moins répandue que l'éolienne horizontale mais tend progressivement à la remplacer.

Son principal atout est sa capacité à capter des vents faibles :

- L'éolienne verticale n'a donc pas besoin de rafales ou de vents puissants, voire violents, pour fonctionner, car elle n'a pas besoin de s'orienter par rapport au vent.
- De plus, elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale et peut fonctionner quel que soit le sens du vent. (17)

c. Les différents types d'éolienne à axe vertical

De plus en plus de catégories d'éoliennes à axe vertical voient le jour si bien qu'elles sont en passe de remplacer les éoliennes à axe horizontal :

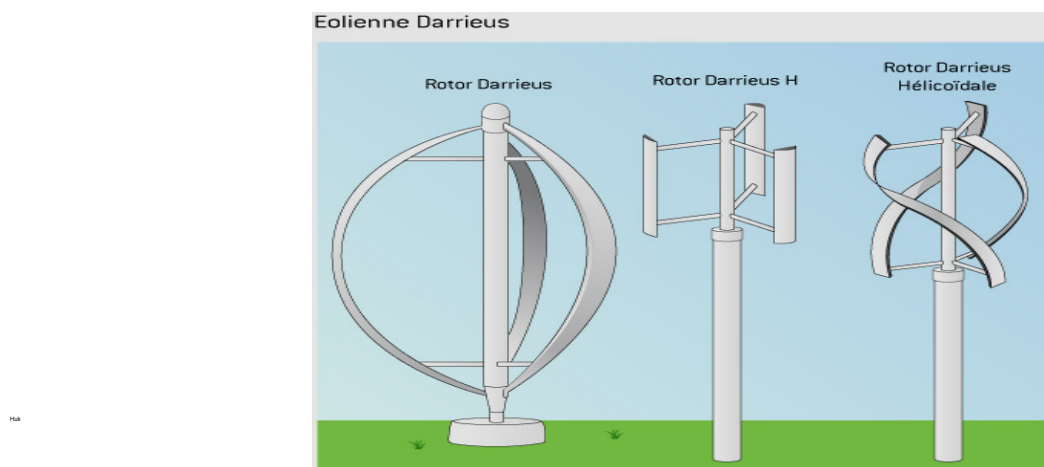


Figure 15 : éolienne Darrieus(17)

Du nom de son inventeur, l'éolienne verticale de type Darrieus produit de l'électricité grâce à un rotor, qui peut être lui aussi de différent type (hélicoïdale, H, cylindrique), qui tourne autour d'une tige fixe, appelée stator à ailettes.

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

- Elle peut être installée dans des zones très venteuses, puisqu'elle peut subir des vents dépassant les 60 m/s.
- En outre, cette éolienne émet moins de bruit qu'une éolienne horizontale et occupe moins de place. De plus, vous pouvez l'installer directement sur le toit.
- Autre aspect pratique, son générateur peut ne pas être installé en haut de l'éolienne, au centre des rotors, mais en bas de celle-ci. Ainsi plus accessible, il peut être vérifié et entretenu plus facilement.

Les inconvénients de l'éolienne à axe vertical Darrieus est un faible rendement et son démarrage difficile dû au poids du rotor sur le stator. (17)

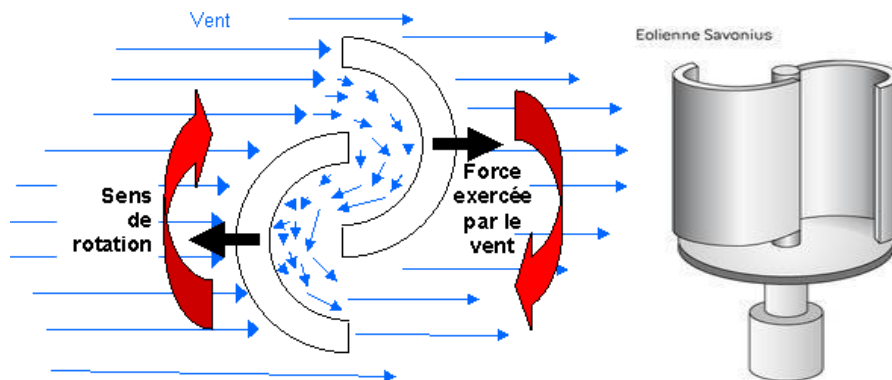


Figure 16 : éolienne domestique Savonius (17)

Du nom de leur inventeur, Ségur qui a breveté Savonius ce système en 1929, l'éolienne verticale Savonius consiste en au moins deux demi-cylindres installés de manière légèrement désaxée l'un par rapport à l'autre.

Le vent s'engouffre dans l'un des demi-cylindres et le pousse. Les demi-cylindres n'étant pas rattachés en un même point, mais légèrement désaxés, le vent continue sa course dans l'autre demi-cylindre, qu'il pousse à son tour.

Les avantages de cette éolienne verticale sont :

- d'une part, son esthétisme et la possibilité de l'installer sur une toiture,
- d'autre part, le fait qu'elle fonctionne même avec un vent faible (contrairement au système Darrieus), quelle que soit sa direction. (17)

d. Avantages et limites de l'éolienne verticale

- Cette éolienne présente un atout indéniable : elle parvient à très bien capter les vents faibles. Elle fonctionne donc en tout temps.
- Elle s'adapte aussi très bien aux différents sens du vent.
- L'éolienne verticale exige par ailleurs beaucoup moins d'espace que l'éolienne horizontale.

Le rendement de cette éolienne est moins élevé que celui de l'éolienne horizontale. Elle produit donc beaucoup moins d'électricité.

4. L'éolienne horizontale

a. Définition

L'éolienne horizontale est le modèle le plus répandu. Elle capte le vent (de face ou de dos selon le modèle) grâce à des pales assemblées en hélice. Celles-ci tournent autour d'un mât placé horizontalement par rapport au sol. Le générateur, actionné par la rotation de l'hélice, et situé en haut de l'éolienne. C'est la plus utilisée par les particuliers car son rendement est plus important. Un parc éolien ou une ferme éolienne désignent les unités de production groupées. Elles sont installées à terre ou en mer. L'éolienne horizontale est le type le plus répandu des installations qui produisent de l'énergie en utilisant le vent. (18)



Figure 17: une éolienne à axe horizontal (24)

b. Catégorie d'éolienne à axe horizontal:

- **Amont :**

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

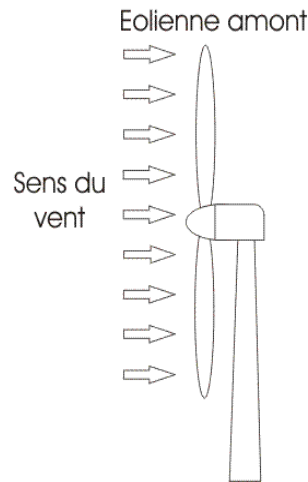


Figure 18: une éolienne à axe horizontal amont(20)

- **Aval :**

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

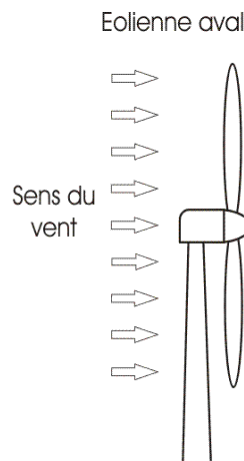


Figure 19 : une éolienne à axe horizontal aval(20)

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette

direction.

Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal avec un rotor du type hélice, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle. (20)

c. Les composantes d'une éolienne horizontale

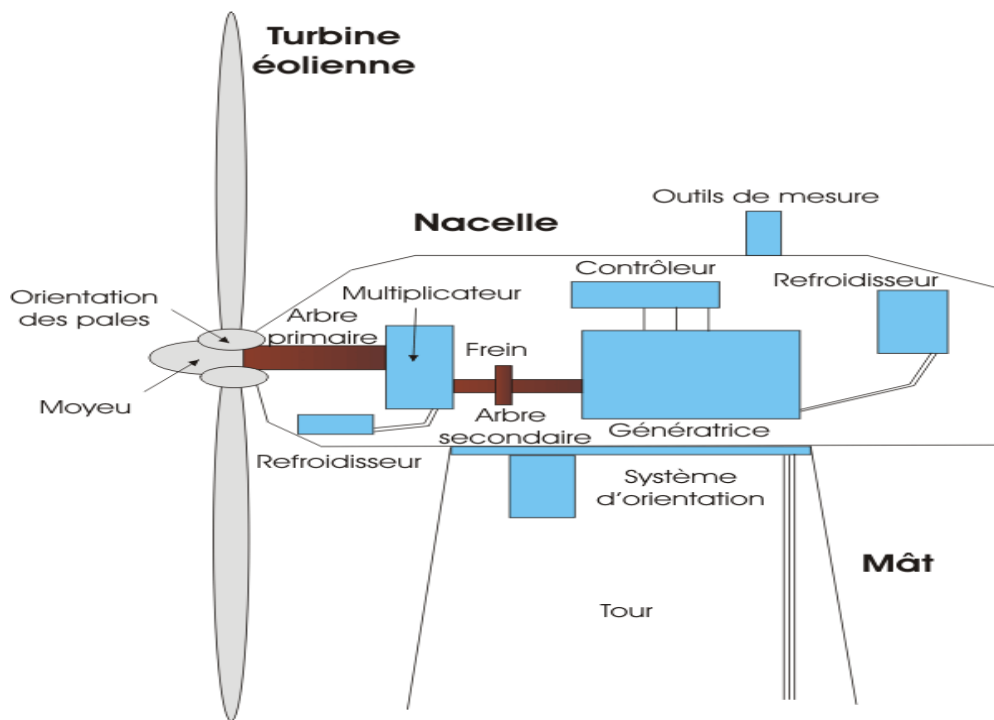


Figure 20 : les composantes d'une éolienne horizontale(21)

Une éolienne est composée principalement de quatre sous-ensembles :

- **rotor** : partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute ;
- **La nacelle** : structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques. On distingue les éoliennes à entraînement direct de celles équipées de train d'engrenages (multiplicateur/réducteur) selon le type d'alternateur utilisé. Les alternateurs

classiques requièrent une adaptation de la vitesse de rotation par rapport au mouvement initial du rotor.

- **la tour** : composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur. Généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau ;
- **la base** : souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de maintenir la structure globale. (21)

d. Fonctionnement d'une éolienne horizontale

L'éolienne horizontale va fonctionner sur les mêmes principes que les éoliennes que l'on peut voir sur les parcs éoliens et qui ont des capacités importantes.

L'éolienne à axe horizontal destinée à des particuliers va capter le vent de face ou de dos (selon le modèle). C'est possible grâce à des pales qui sont assemblées en hélice.

Les hélices de l'éolienne horizontale tournent autour d'un mât qui est placé horizontalement par rapport à la terre.

La rotation de l'hélice actionne un générateur qui est situé en haut de l'éolienne.

L'hélice d'une éolienne horizontale est constituée de deux ou de trois pales. Avoir trois pales permet d'améliorer sensiblement les performances de l'éolienne.(18)

e. Avantages d'une éolienne horizontale

L'éolienne à axe horizontal pour particulier a plusieurs avantages. Tout d'abord, son rendement est excellent. Elle capte au mieux l'énergie du vent et s'oriente seule vers la direction du vent.

Son rendement moyen est compris entre 10kW et 20 kW, selon le modèle. Pour les éoliennes verticales, il atteint au maximum 10kW. Comme ce modèle d'éolienne est le plus courant chez les particuliers, il est donc facile de trouver un vendeur ou un installateur. C'est un aspect important de la question des éoliennes.

f. Inconvénients d'une éolienne horizontale

L'éolienne horizontale possède également quelques inconvénients. L'un d'eux est qu'elle est moins résistante aux vents forts que l'éolienne qui est verticale. Elle doit donc souvent être

renforcée. Dans les régions où les risques de tempêtes existent, on utilise des mâts haubanés, à l'ancrage renforcé. Au niveau du rotor, on installe un frein. Une mesure de sécurité intéressante est qu'au-delà d'une certaine vitesse, les pales de l'éolienne horizontale cessent de tourner. C'est une mesure de sécurité.

Un autre inconvénient de l'éolienne horizontale, par rapport à la verticale, est qu'elle met plus de temps à se déclencher. Elle doit notamment s'orienter par rapport au vent. Cela retarde son déclenchement.

5. L'énergie éolienne au Maroc

a. Historique et nouvelles opportunités

Après le deuxième choc pétrolier, le Maroc, à l'instar de beaucoup de pays disposant de peu de ressources énergétiques conventionnelles, s'est intéressé aux énergies renouvelables.

C'est ainsi que, dès 1982, avec la création du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), établissement public sous la tutelle du Ministère de l'Énergie et des Mines, le Département de l'Énergie a intégré les énergies renouvelables dans la politique énergétique nationale. Après des phases de prospection, de maturation de l'offre technique et de développement de projets pilotes importants, les énergies renouvelables ont été adoptées par des programmes nationaux de développement, notamment d'électrification et d'approvisionnement en eau potable des zones rurales pour le photovoltaïque et par la mise en œuvre de projets de parcs éoliens de puissance et de centrales thermo solaires. (26)

Concernant l'énergie éolienne, l'un des principaux atouts pour le Maroc est son gisement.

b. Le gisement éolien marocain

Le Maroc bénéficie d'un gisement éolien important avec des régions dépassant 10 m/s de vitesse annuelle moyenne du vent. La mise en évidence de ce gisement a été réalisée par (CDER) avec l'aide de la coopération allemande (GTZ) qui a permis l'installation de plusieurs mâts de mesure sur différents sites et le suivi des données sur des périodes d'au moins une année.

Ce programme se doit d'être développé pour affiner les données dans certaines régions prometteuses. Il a cependant permis de définir les sites où aujourd'hui les grands projets éoliens sont lancés.

Une première carte éolienne du pays a montré que la zone Nord (Tanger à Tétouan) et la bande côtière allant de Tarfaya jusqu'à Lagouira présentent des sites exceptionnels avec des vents réguliers et des vitesses moyennes suffisantes pour développer des projets rentables.
(23)

6. Energie fournie par le vent

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, elle est fonction de la masse et de la

vitesse du volume d'air : $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ (1)

- m : Masse du volume d'air (kg)
- v : vitesse instantanée du vent (m/s)
- E_c : Énergie cinétique (J)

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15°C , la masse volumique d'air est environ $1,23 \text{ kg}/\text{m}^3$

7. Puissance du vent

On a :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Vv^2 \quad (2)$$

En considérant S la surface balayée par les pales, et en faisant l'hypothèse que la vitesse du vent est identique en chaque point de cette surface, la puissance reçue est :

$$P = \frac{1}{2}\rho \frac{V}{t}v^2 = \frac{1}{2}\rho S v^3 \quad (3)$$

- ρ : masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : 1,23kg /m³ à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar)
- S : surface balayée (m²)
- v : vitesse du vent (en m/s)

Cette puissance est une puissance théorique, il est bien sûr impossible qu'elle soit récupérée tel quelle par une éolienne(25)

8. La limite de Betz

Considérons une éolienne avec un rotor balayant une surface S , Considérons le vent en amont de la pale se déplace à une vitesse v_1 , et en aval avec la vitesse v_2 .

La puissance contenue en amont de l'éolienne est :

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad (1)$$

□ La puissance contenue dans la masse de vent en aval de l'éolienne :

$$P_2 = \frac{1}{2} \rho S v_2^3 \quad (2)$$

□ La puissance perdue par cette masse de vent est bien sûr celle qui a été capté par les pales et transformée en énergie mécanique est :

$$P_r = P_1 - P_2 \quad (3)$$

Si nous considérons que la masse d'air franchit l'éolienne à une vitesse moyenne de

$\frac{v_1 + v_2}{2}$ Alors :

$$(3) \text{ devient : } P_r = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \left(\rho S \frac{v_1 + v_2}{2} \right) (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)$$

Pour comparer cette puissance récupérée par l'éolienne à la puissance en aval de l'éolienne,

on calcul le rapport $\frac{P_r}{P_1}$:

$$\frac{P_r}{P_1} = \frac{\frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2) (v_1^2 + v_2^2)}{\frac{1}{2} \rho S v_1^3} = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \left(\frac{1}{v_1} - \frac{v_2^2}{v_1^3} \right) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right)$$

La fonction $\frac{P_r}{P_1} = f\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$ atteint un maximum lorsque : $d\left(\frac{P_r}{P_1}\right) = 0 \rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$

Pour $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ on obtient : $\left[\frac{P_r}{P_1} \right]_{\max} = 0,592$

La courbe ci-dessous représente les variations de $\frac{P_r}{P_1}$ en fonction de $\frac{v_2}{v_1}$

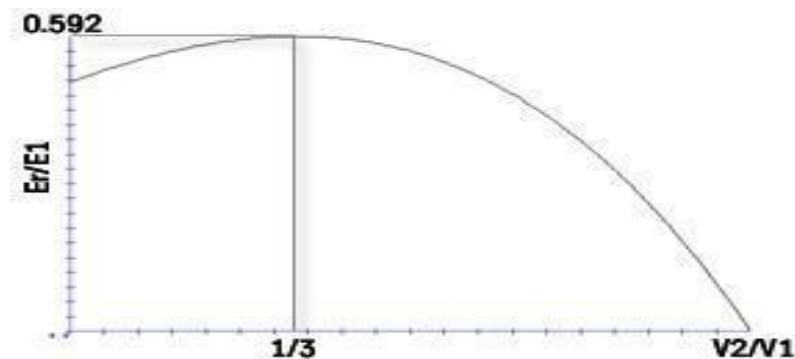


Figure 21 : la courbe de variation de la fraction de puissance captée par le rotor(25)

Le maximum de cette courbe est 0,592, soit 59,2 % l'énergie E_r captée par le rotor ne pourra en aucun cas dépasser 59,2% de l'énergie E_1 du vent en aval.

Remarque : il n'existe pas de rendement de 100 % même avec une éolienne idéale : capter toute l'énergie du vent, reviendrait à le stopper complètement ce qui est impossible.

9. Coefficient de puissance maximale

La puissance du vent incident est :

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho S v_1^3$$

D'après si qui précède on peut écrire : $P_{\max} = \eta_{\max} \times P_1$

Avec $\eta_{\max} = 0,593 = 16 / 27$, $\eta_{\max}$ est appelé coefficient de puissance maximale.

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P_1 = \frac{8}{27} \rho S v_1^3$$

L'application des principes fondamentaux de la mécanique permet de déterminer la quantité maximale d'énergie du vent qui peut-être convertie en énergie mécanique (rotation du rotor). Ce rendement aérodynamique instantané, ou Coefficient de performance (Cp), ne peut dépasser 16/27 soit approximativement 59 %. Par conséquent, le rendement instantané qui tient aussi compte d'autres pertes (aérodynamiques, accouplement, conversion électrique, auxiliaires) doit être inférieur à cette valeur.

10. Rendement globale d'un aérogénérateur

L'énergie fournie par l'aérogénérateur étant toujours transformée, cette limite est donc affectée par tous les rendements propres aux différentes transformations

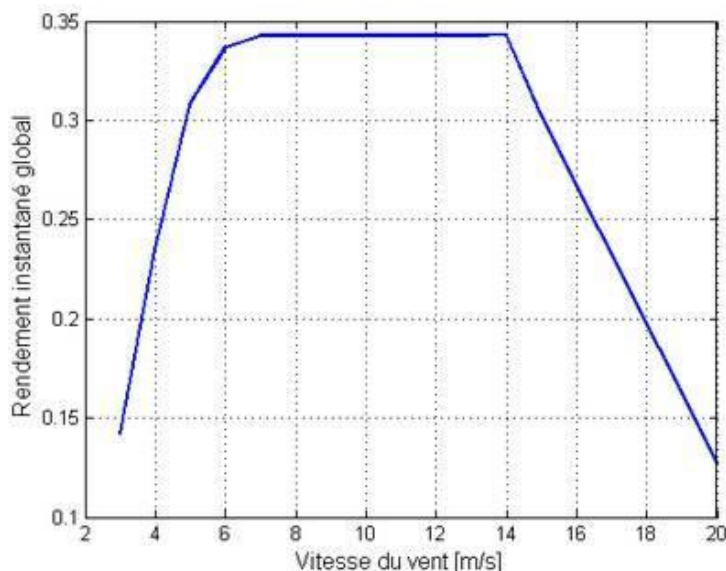


Figure 22 : le rendement d'éolienne à axe verticale(16)

On distingue clairement la vitesse minimale de 3 m/s, la vitesse maximale de 20 m/s ainsi que puissance nominale de 40 kW obtenue à 15 m/s. Un simple calcul montre que le rendement instantané global ne dépasse pas 35 %.

Dans la pratique, les modèles de plus faibles puissances ne bénéficient pas de cette certification. Le constructeur peut fournir une courbe de puissance, mais on n'a aucune garantie sur sa fiabilité, tout au plus, on peut se reposer sur la crédibilité du fabricant.

Rendement global instantané < rendement aérodynamique < 16/27

Cette limitation est mieux connue sous le nom de "limite de Betz" ou "théorie de Betz". Pour arriver à ces conclusions, il a fallu introduire des hypothèses simplificatrices. Néanmoins, celles-ci sont tout à fait raisonnables. (16)

On peut aussi connaître le rendement moyen de l'éolienne sur la période d'observation, T. On peut estimer, d'un côté, l'énergie du vent qui était disponible (la source d'énergie), E_{vent} , et, d'un autre côté, l'énergie électrique produite par l'éolienne, E_{elec} (comme calculée ci-dessus).

Le rapport de ces deux valeurs donne le rendement moyen :

$$\text{Rendement moyen global} = E_{elec} / E_{vent}$$

Par global, on sous-entend que l'on s'intéresse à ce qui rentre et ce qui sort globalement de l'éolienne. On trouve typiquement, un rendement moyen de 20 % pour les petites éoliennes et de 35 % pour les grands modèles. (16)

11. Puissance d'une éolienne

La puissance de sortie d'une turbine c'est la puissance finale qui atteint compte du rendement des différents éléments de conversion, en tenant compte du coefficient du rendement maximal η_{max} et des rendements des conversions. (25)

La courbe de puissance d'une éolienne

La puissance maximale dépend beaucoup plus de la vitesse du vent que de l'air de la surface balayée par les pales.

La courbe de puissance est un graphe qui représente la puissance de sortie d'une éolienne à différentes vitesses de vent.

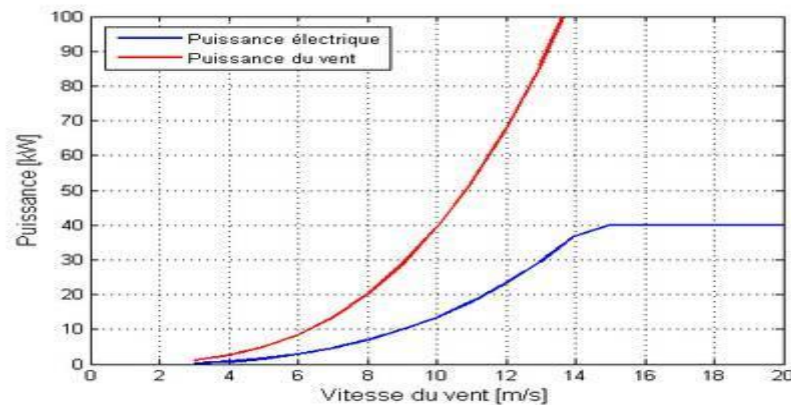


Figure 23 : courbe de puissance d'une éolienne(16)

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

On peut distinguer 4 parties sur cette courbe :

- $0 < v < 3$ P_s est pratiquement nulle : la puissance de sortie est nulle, le vent n'est pas suffisamment important pour entraîner la rotation du rotor
- $3 < v < 15$ P_s augmente jusqu'à atteindre la puissance nominale (ici 40 kW)
- $15 < v < 20$ P_s est maintenue presque constante à la puissance nominale
- $v > 20$ vitesse de coupure : l'éolienne est mise à l'arrêt pour protection, $P_s = 0$

12. Le potentiel éolien

Le potentiel éolien d'un site c'est l'énergie du vent de ce site. Pour évaluer ce potentiel il faut disposer de la vitesse du vent pour ce site. Comme la vitesse du vent est très variable, des mesures de longue durée (minimum année de mesure complète) sont nécessaires pour caractériser le site. Lorsqu'on dispose des données d'un site, on procède à une représentation d'un graphe en histogrammes des fréquences de la vitesse du vent.

Dans l'éolien, le Maroc jouit d'un potentiel très important plus particulièrement le long de ses côtes avec des vitesses de vent supérieur à 6.5 m/s et allant jusqu'à 10m/s. Le potentiel

technique dépasse certainement 10 000 MW de capacité installée. Toutefois ce potentiel est limité principalement par la capacité d'intégration au réseau électrique au moins à moyen terme, soit d'ici 2020. Cette limite peut être atténuée par de nouveaux investissements visant à renforcer le réseau électrique mais les contraintes de maintien de la stabilité du réseau particulièrement en période de faible charge est une réalité incontournable. Plusieurs pays ont adopté une limite de 20% de la capacité totale installée afin de fixer dans une première étape de développement éolien un objectif réalisable. (22)

13. Les projets éoliens du Maroc :

a. Parcs d'Abdelkhalek Torres/ Tétouan

Suite à la découverte du site exceptionnel de Koudia El Baida (entre Ksar Sghir et Tétouan) où la vitesse moyenne des vents atteint 11 m/sec, l'ONE a lancé en 1994 un appel d'offres pour un parc éolien de 50 MW selon la formule BTOT (Build Transfer Operate and Transfer) où l'ONE reste le propriétaire du parc et le concessionnaire produit et vend l'électricité pendant 20 ans à l'ONE qui est le seul acheteur. En outre, il est prévu que le consortium retenu est responsable de l'exploitation du parc éolien jusqu'à l'expiration du contrat de fourniture de l'énergie électrique à l'ONE et aura la possibilité de négocier une extension de ce contrat, sous réserve d'un accord mutuel entre les deux parties. Si un accord n'était pas conclu pour l'extension du contrat, le parc éolien deviendrait propriété de l'ONE sans aucun paiement supplémentaire.

- L'investissement relatif à ce projet s'est élevé à 52 millions \$US. L'ordre de grandeur du prix du KWh serait de 70 centimes de Dirham. Le consortium choisi a eu le statut de producteur concessionnaire d'énergie électrique au Maroc.

b. Le projet de Tanger

Ce projet, d'une puissance prévue de 140 MW, sera composé de 165 aérogénérateurs. L'appel d'offres pour la réalisation de ce parc éolien a été lancé en février 2006. En octobre de la même année, le contrat a été attribué à l'entreprise espagnole Gamesa Eolica.

D'un montant de 330 millions de dollars, les travaux dureront dix-huit mois, et la centrale devra être opérationnelle au cours du premier trimestre 2009. Elle sera construite sur une crête montagneuse entre Tanger et Tétouan, sur les douars de Bni-Mejmel et de Dar-Saadane. Le financement sera assuré par la Banque européenne d'investissement (BEI).

c. Le Parc éolien d'Essaouira

Implanté sur le site de Cap Sim à 15 km au sud de la ville d'Essaouira, le parc éolien en cours de construction sera d'une puissance installée de 60 MW. La formule choisie n'est pas un BOT dans ce cas, l'ONE ayant obtenu un financement KfW (agence allemande de coopération financière) pour le projet. Après achèvement des études de site et d'impact environnemental, un appel d'offres international pour la réalisation du parc éolien a été lancé par l'ONE en novembre 2004.

14. Conclusion

Le Maroc a pu, grâce aux nouvelles dispositions prises ainsi qu'aux financements obtenus, relancer la filière de l'énergie éolienne. Avec cette volonté d'atteindre les 2000 MW de capacité en 2020, une nouvelle opportunité industrielle s'est ouverte. Après la fabrication des mâts, d'autres composants sont étudiés pour une fabrication locale créatrice d'emplois, un atout social qui s'ajoute à l'enjeu environnemental.

Chapitre III : Énergie hydraulique et biomasse

L'énergie hydraulique dépend du cycle de l'eau. Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable. Permet de fabriquer de l'électricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force de l'eau.

Cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute), soit du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau). [33]

La biomasse représente l'ensemble de la matière organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Elle peut être issue de forêts, milieux marins et aquatiques, haies, parcs et jardins, industries générant des coproduits, des déchets organiques ou des effluents d'élevage.

Cette matière organique est la matière qui compose les êtres vivants et leurs résidus ayant pour particularité d'être toujours composée de carbone (du bois aux feuilles en passant par la paille, les déchets alimentaires, le fumier...).

Bref, une source d'énergie tirée de ce qui pousse et de ce qui vit ! [42]

1. Energie hydraulique

a. Définition

Comme l'énergie éolienne qui utilise la force du vent, l'énergie hydraulique est une énergie primaire utilisant la force des cours d'eau. C'est une énergie renouvelable car comme pour le vent, sa source est inépuisable mais contrairement à l'énergie du vent, les cours d'eau ne cessent de couler. C'est une énergie permanente.

L'origine de l'énergie hydraulique est le cycle de l'eau (évaporation-précipitation) causé par le rayonnement solaire sur le globe terrestre ainsi que la force gravitationnelle qui permet à l'eau de couler de haut en bas. L'énergie hydraulique est utilisée depuis l'antiquité sous forme d'énergie mécanique pour moudre le grain dans les moulins à eau placés le long des cours d'eau.

Ce principe a été perfectionné pour actionner des forges, pour carder la laine, tanner les peaux, etc., au cours de l'époque préindustrielle.

Actuellement, l'énergie hydraulique est essentiellement utilisée pour produire de l'électricité.

On parle alors d'énergie hydroélectrique. [39]

b. Principe de fonctionnement

Il s'agit de capter la force motrice de l'eau pour produire de l'électricité.

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie cinétique puis en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

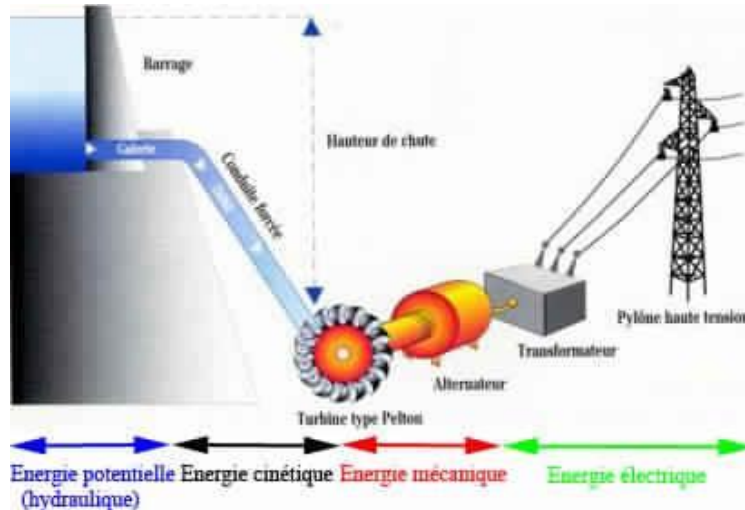


Figure 24 : principe de fonctionnement d'hydraulique

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- -hauteur de la chute
- -débit de la chute

Puissance d'une chute d'eau :

-La définition de l'énergie potentielle est : $W = m \cdot g \cdot h$ (1)

- Avec :
- W : énergie potentielle en Joules (J)
- m : masse de l'eau en Kilogrammes (Kg)
- g : accélération de la pesanteur (m/s^2) ou (N/Kg) ($g = 9,81$)
- h : hauteur de la chute d'eau (m)

-La définition de la puissance est : $P = \frac{W}{\Delta t}$ (2)

- Avec :
- P : puissance utile de la chute d'eau en Watt, (W)
- Δt : durée en secondes (s)

-On peut alors calculer la puissance d'une chute d'eau en fonction de sa hauteur et de son débit

$$P = \frac{m \cdot g \cdot h}{\Delta t} \quad (3)$$

-Or : $m = u \cdot V$

- Avec :
- $u : (\text{Kg}/\text{m}^3)$
- $V : (\text{m}^3)$

$$\text{-Donc : } P = \frac{u \cdot V \cdot g \cdot h}{\Delta t} \quad (4)$$

$$\text{-Et : } Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (5)$$

- Avec :
- $Q : \text{Débit de la chute d'eau } (\text{m}^3/\text{s})$

$$\text{-Au final on a : } P = Q \cdot u \cdot g \cdot h \quad (6)$$

On voit que, pour avoir une puissance importante, le produit $Q \cdot h$ doit être le plus élevé possible. L'idéal est d'avoir un grand débit sur une grande hauteur de chute. Malheureusement ces deux conditions sont rarement réunies. Les termes u et g étant constants.

Remarque : La masse volumique de l'eau est 1, donc 1 m^3 correspond à une masse de 1000 kg. On obtient alors une expression de P en Kilo Watt (KW) :

$$P = Q \cdot g \cdot h$$

c. Types de centrales hydrauliques

i. Les centrales hydrauliques basses chutes (ou au fil de l'eau)

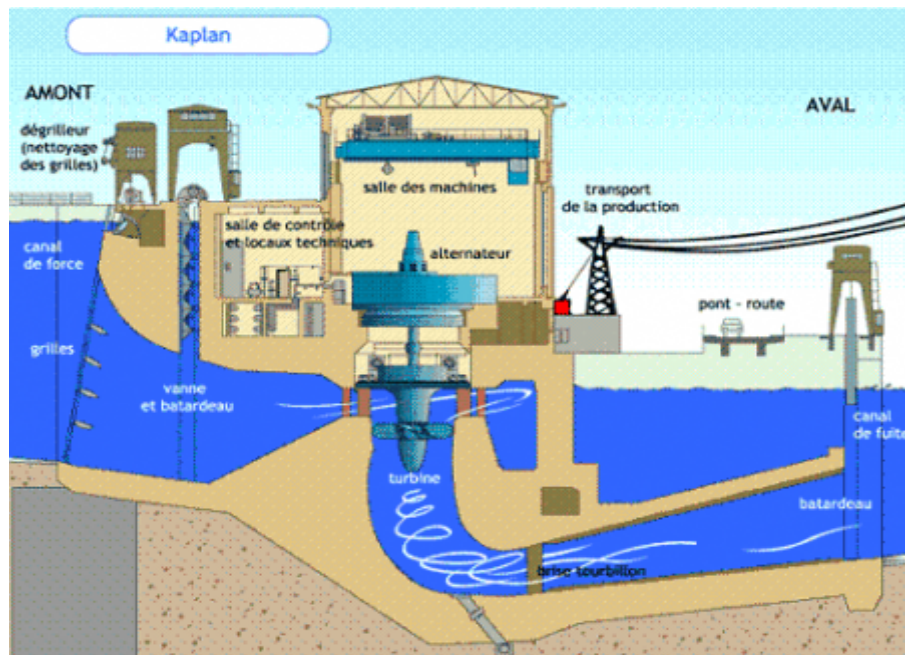


Figure 25 : la centrale hydraulique basse chute

Elles sont caractérisées par un débit très important mais avec une faible hauteur de chute.

Les centrales de basse chute, se trouvent sur les grands fleuves et fonctionnent au fil de l'eau et produisent sans interruption.

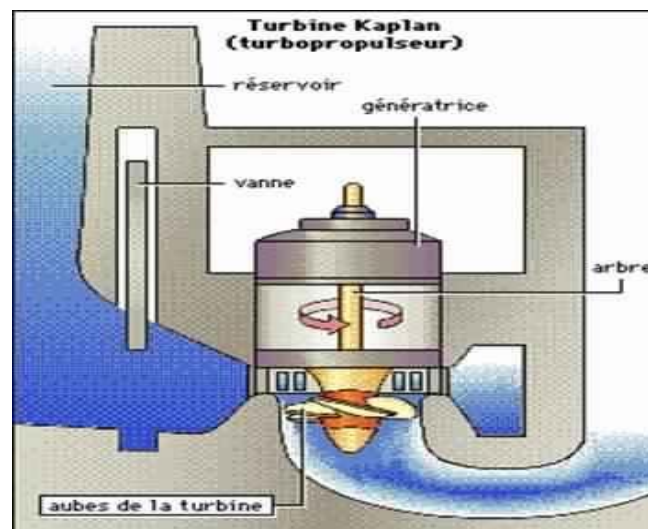


Figure 26 : turbine à réactions type Kaplan

Les usines de basse chute sont équipées de turbine à réactions type Kaplan avec de pales qui s'orientent en fonction du débit.

ii. Les centrales hydrauliques moyennes chutes

Les centrales de moyennes chutes sont caractérisées par une hauteur de chute comprise entre 30 et 200m. L'usine se situe généralement au pied du barrage. Ce sont souvent des usines de retenues. Elles se trouvent en moyenne montagne, elles utilisent les réserves d'eau accumulées sur des courtes périodes. Ces centrales d'écluse servent pour la régulation journalière ou hebdomadaire de la production.

Les usines de moyenne chute sont équipées de turbine Francis qui permettent l'utilisation de l'eau à moyenne pression. L'eau est dirigée contre les pales de la turbine par des ailettes de guidage, puis rabattue vers le centre de la roue. [40]

iii. Les centrales hydrauliques hautes chutes

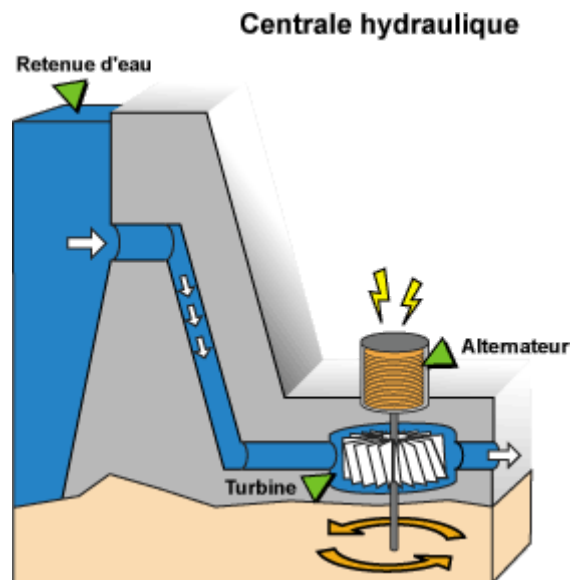


Figure 27 : centrale hydraulique

Les centrales de hautes chutes sont caractérisées par une forte hauteur de chute $h > 200\text{m}$. L'usine est toujours située à une distance importante de la prise d'eau parfois plusieurs kilomètres. Elles se trouvent en altitude, les usines de lacs disposent de plus de 400 heures de réserves. Leur rapidité de démarrage permet de répondre de consommation, notamment en hiver.

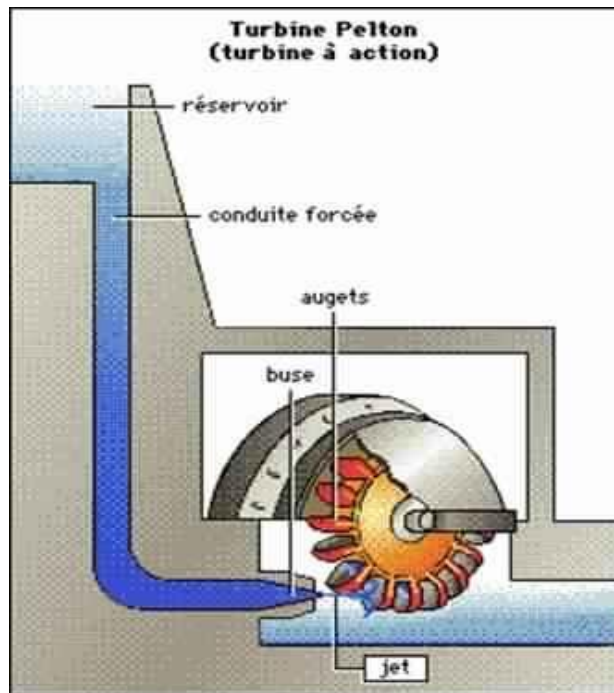


Figure 28 : turbines Pelton

Les usines de haute chute sont généralement équipées de turbines Pelton : l'eau arrive en deux jets de la roue équipée de pales en forme de godets.

Remarque : Le rapport moyen Puissance électrique / Puissance Potentiel de la chute d'eau est en moyenne d'environ 0.7.

Le rendement est ainsi de 70%.

$$\text{La puissance électrique } P_e = 0.7P_p \Leftrightarrow P_e = 7.Q .h \text{ (} 0.7g = 7 \text{)} \quad (7)$$

- Avec :
- P_e : Puissance électrique injectée au réseau en Kilo Watt (KW) ou en Kilo Volt Ampère (KVA).

Plus généralement d'après le rendement η caractéristique de la centrale (plus particulièrement du couple turbine - alternateur inscrit par le fabricant) on a : $P_e = \eta . g . Q . h$ (8)

Vers des micros centraux hydrauliques...

Le principe est identique mais en miniature et pour des particuliers. L'électricité produite est directement utilisée ou stockée dans des accumulateurs ou alors peut être revendue à un

réseau électrique.

Il n'y a pas d'énormes barrages : poissons et canoéistes peuvent désormais circuler librement grâce aux dispositions prises par les exploitants.

La qualité de l'eau est préservée : au maximum 10 % du débit d'eau est turbiné, les propriétés physico-chimiques de l'eau étant ainsi conservées. Certains exploitants vont même jusqu'à dépolluer les rivières (poubelles des riverains, pneus, plastiques...).[40]

d. Avantages et Inconvénients

i. Avantage:

- -Production d'énergie active durant les heures de fortes consommations d'électricité.
- -Pompage durant les heures creuses afin de reconstituer la réserve d'eau dans le bassin de retenu. Ce procédé permet de stocker l'énergie électrique en surplus du réseau en une énergie potentielle qui sera transformée à nouveau.
- -Démarrage et arrêt des centrales très rapides.
- -Aucune pollution n'est dégagée lors de la production d'électricité.
- -Production d'électricité décentralisée (pas de pertes liées aux transports).
- -Facilité d'entretien et la faible usure du matériel qui travaille à vitesse et à température modérée.
- -Haut niveau de rendement des machines, capable de transformer 90% de l'énergie de l'eau en énergie mécanique.
- -Souplesse d'exploitation, qu'accroissent encore les progrès de l'automatisme et des télécommandes. [39]

ii. Inconvénients :

- -Modification du débit et du niveau de l'eau.
- -Perturbation de la faune et de la flore.
- -Surcoût lié à la nécessité d'installer des passes à poissons.
- -Risque pour les personnes en aval lié au barrage. [40]

e. Installation hydraulique

L'hydraulique n'est pas une technique autonome, c'est à dire qu'il faudra obtenir l'énergie à partir d'un moteur électrique (exemple d'une presse d'atelier) ou d'un moteur thermique (exemple du tracteur ou de la pelleteuse). Pour obtenir le mouvement c'est un fluide qui va assurer la transmission, ce liquide sera propulsé par une pompe

La pompe est entraînée par le moteur thermique. A gauche de la pompe on aspire le fluide à partir d'un réservoir à la pression atmosphérique et à droite un débit est engendré à une pression disponible en fonction du travail demandé.

Le fluide envoyé par ma pompe hydraulique se dirige ensuite vers un distributeur hydraulique de plusieurs éléments (en fonction du nombre de mouvements effectués). Si les leviers ne sont pas commandés le fluide traverse le distributeur et retourne au réservoir. Si on agit sur un ou plusieurs leviers, on va donc diriger le liquide hydraulique de la pompe vers les récepteurs hydrauliques.

Le distributeur hydraulique comporte également un clapet de sécurité qui limite la pression à une valeur maximum. Ce limiteur de pression s'ouvre lorsque la résistance rencontrée par les récepteurs atteint la valeur de tarage (pression). Lorsqu'il y a ouverture du limiteur, le fluide est renvoyé directement au réservoir. Le réglage est important car celui-ci va limiter le couple sur le moteur hydraulique ou la force sur un vérin.

L'échangeur est un appareil que l'on retrouve souvent sur les circuits hydrauliques car il dissipe les calories engendrées dues aux échauffements

Le filtre permettra de recueillir les impuretés du circuit et celles introduites lors de l'installation de composants hydraulique sur le circuit.

Les vérins simple effet et double effet permettent de transmettre des mouvements linéaires. Leurs dimensions varient en fonction des efforts et des vitesses demandées.

Le moteur hydraulique assure des mouvements rotatifs avec des couples et des vitesses qui dépendent principalement de la fonction à remplir.

f. Les éléments hydrauliques

Pour déterminer avec précision les éléments hydrauliques soit un petit ou un gros vérin hydraulique, un moteur de faible ou de grande cylindrée, quelques notions essentielles sont à connaître: la pression - la vitesse - la puissance

i. La pression hydraulique

La pression hydraulique, par définition de son inventeur Blaise Pascal (1623 - 1662), est une pression extérieure exercée sur une partie d'un fluide confiné qui se transmet à toutes les autres parties, sans aucune perte. La pression agit avec une force égale sur toutes les surfaces égales des parois de confinement et perpendiculaires aux parois.

Une machine hydraulique concerne la façon dont un liquide agit dans un système fermé de tuyaux et cylindres. L'action d'un liquide dans de telles conditions est quelque peu différente de son comportement dans un milieu ouvert ou dans des lacs, des rivières ou des océans. Vous devez également garder à l'esprit que vous ne pouvez pas compresser la plupart des liquides dans un espace restreint.

ii. Calcul de pression hydraulique

Une pression est le rapport entre une force et l'aire de la surface sur laquelle s'applique cette force. Par conséquent, la pression hydraulique est la force par unité de surface exercée par un fluide sur la surface à l'intérieur du récipient.

Selon les lois de Pascal, ces principes indiquent que la pression appliquée à un fluide confiné en un point quelconque est transmis intact à travers le fluide dans toutes les directions et agit sur toutes les parties de la cuve de confinement, perpendiculairement à ses surfaces intérieures et également sur des surfaces égales.

Ceci est le principe de base de n'importe quel système hydraulique, que la pression en un point quelconque à un corps de fluide provoque une force à transmettre uniformément dans toutes les directions, avec la force agissant perpendiculairement à une surface en contact avec le fluide

g. Fonctionnement technique

Les centrales hydrauliques sont constituées de 2 unités principales:

Une retenue ou une prise d'eau (dans le cas des centrales au fil de l'eau) qui permet de créer une chute d'eau, avec généralement un réservoir de stockage afin que la centrale continue de fonctionner, même en période de basses eaux. Un canal de dérivation creusé peut permettre de dériver latéralement l'excédent d'eau arrivant vers un étang de barrage. Un évacuateur de crues permet de faire passer les crues de la rivière sans danger pour les ouvrages ;

La centrale, appelée aussi usine, qui permet d'utiliser la chute d'eau afin d'actionner les turbines puis d'entraîner un alternateur.

i. Les barrages

Les plus fréquents, de loin, sont les barrages en remblai de terre ou d'enrochements obtenus en carrière par abattage à l'explosif. L'étanchéité est centrale (en argile ou en béton bitumineux) ou sur la surface amont (en béton de ciment ou en béton bitumineux). Ce type de barrage s'adapte à des géologies très variées ; les barrages poids construits d'abord en maçonnerie, puis en béton puis plus récemment en béton compacté au rouleau (BCR) qui permet d'importantes économies de temps et d'argent. Le rocher de fondation doit être de bonne qualité ; les barrages voutes en béton adaptés aux vallées relativement étroites et dont les rives sont constituées de rocher de bonne qualité. La subtilité de leurs formes permet de diminuer la quantité de béton et de réaliser des barrages économiques ; les barrages à voutes multiples et à contreforts ne sont plus construits. Les barrages poids en BCR les remplacent.

ii. Les turbines

Les centrales sont équipées de turbines qui transforment l'énergie du flux d'eau en une rotation mécanique de façon à actionner des alternateurs.

Le type de turbine utilisé dépend de la hauteur de la chute d'eau :

Pour les très faibles hauteurs de chute (1 à 30 mètres), des turbines à bulbe peuvent être utilisées. Pour les faibles chutes (5 à 50 mètres) et les débits importants, la turbine Kaplan est privilégiée : ses pales sont orientables ce qui permet d'ajuster la puissance de la turbine à la hauteur de chute en conservant un bon rendement ;

La turbine Francis est utilisée pour les moyennes chutes (40 à 600 mètres) et moyen débit. L'eau entre par la périphérie des pales et est évacuée en leur centre ;

La turbine Pelton est adaptée aux hautes chutes (200 à 1 800 mètres) et faible débit. Elle reçoit l'eau sous très haute pression par l'intermédiaire d'un injecteur (impact dynamique de l'eau sur l'auget).

Pour les petites centrales hydroélectriques, des turbines à prix bas (et dont le rendement est moins bon) et de concepts simples facilitent l'installation de petites unités. [41]

h. Conclusion

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable, peu polluante. Cependant, comme dans le cas des barrages hydroélectriques, cela peut être très perturbant pour l'environnement et les populations locales. De plus, ce sont des projets extrêmement coûteux. Enfin, un autre problème se pose : l'eau est une denrée qui tend à se raréfier et dont tout être vivant a besoin pour vivre. Pour éviter toute perturbation supplémentaire, les projets hydroélectriques sont abandonnés au profit d'autres énergies hydrauliques comme l'énergie marémotrice ou les hydroliennes qui interviennent en milieux marins et qui sont en pleine phase de développement. [43]

2. La biomasse

a. Définition

La biomasse (matière végétale) est une source d'énergie renouvelable. Grâce au processus de photosynthèse, les plantes captent l'énergie du soleil. Quand les plantes sont brûlées, elles libèrent l'énergie du soleil qu'elles contiennent. De cette façon, la biomasse fonctionne comme une sorte de stock naturel de l'énergie solaire. Tant que la biomasse est produite de manière durable et que l'utilisation n'excède pas l'exploitation, le stock est inépuisable.

En général, il existe deux approches principales concernant les plantes utilisées pour la production d'énergie :

Les plantes cultivées spécialement pour l'utilisation d'énergie.

L'utilisation des résidus de plantes utilisés pour autre chose.

En fonction du climat, du milieu naturel et d'autres facteurs, la méthode préconisée peut varier. Pour faire simple, il existe deux façons d'utiliser la biomasse :

Soit convertir directement la biomasse en énergie sous forme de chaleur ou d'électricité.

Soit convertir la biomasse en biocarburants liquides ou en biogaz combustible. [34]

b. Les sources principales de biomasse

On distingue trois sources principales de biomasse :

- La biomasse ligneuse, comme le bois, les feuilles mortes, la paille ou le fourrage qui peuvent être utilisés pour le rendement énergétique de la biomasse. En règle générale, la biomasse ligneuse est convertie par voie sèche.
- La biomasse à glucide comme les céréales, la betterave sucrière et la canne à sucre dont la valorisation se fait par conversion biologique, c'est-à-dire par fermentation ou distillation.
- La biomasse oléagineuse qui regroupe les plantes riches en lipide comme le colza et le palmier à huile. La biomasse oléagineuse est principalement destinée à servir de biocarburants. [33]

Il existe de nombreuses sources de biomasse, qui peuvent se classer en deux familles: la biomasse sèche et la biomasse humide.

- Le bois et la paille (biomasse sèche)

L'humain utilise du bois depuis des millions d'années pour se chauffer ou pour cuisiner. Dans certains pays, cette forme de bioénergie est même la principale source d'énergie : en Tanzanie ou au Népal, le bois représente 80% de l'énergie de chauffage utilisée.

- Le fumier (biomasse humide)

Les excréments d'animaux mélangés à de la litière constituent également une forme de bioénergie utilisée pour produire de l'électricité.

- Les plantes (biomasse humide)

Certaines plantes fournissent un matériau de qualité pour fabriquer du carburant. Elles permettent ainsi, après transformation, d'alimenter en énergie les véhicules ! Huile de

tournesol, cacahuètes, canne à sucre, betterave et graines de soja font donc des ingrédients de choix. Ce carburant est utilisé soit à la place de l'essence, soit en complément de l'essence.

Il est même possible de produire de l'énergie à partir de la plupart de nos déchets biodégradables: les épluchures de cuisine (compost) et des jardins, les boues sanitaires (WC, douches), les déchets agricoles ou issus de l'industrie agroalimentaire [35]

c. Utilisation de la biomasse

On utilise la biomasse de trois manières: l'énergie-bois, le biogaz et les biocarburants.

- La biomasse sèche (bois, paille)

Le bois peut être utilisé directement dans les cheminées pour chauffer les maisons, ou avec un feu de camp pour cuire des aliments. Une autre utilisation permet de produire de l'électricité : les résidus de bois ou de déchets secs sont brûlés dans une chaudière.

La chaleur qui est dégagée chauffe de l'eau qui se transforme en vapeur. La vapeur fait alors tourner une turbine qui permet de produire de l'électricité. La vapeur qui sort de la turbine est récupérée pour être transformée en eau.

Les fumées liées à la combustion passent à travers des filtres pour éviter que les poussières ne s'échappent dans l'air.

La biomasse humide (fumier, compost, boues d'épuration)

La fermentation de matières organiques (végétaux, animaux ou champignons) permet de produire de l'énergie sous forme de biogaz. Cela se passe lorsque ces matières se décomposent, dans les marais ou dans un compost par exemple. Dans ce cas, la fermentation se produit spontanément.

Il est aussi possible de provoquer cette fermentation dans des installations appelées des digesteurs.

- Le biogaz, composé principalement de méthane, est obtenu en mettant les matières organiques, du maïs par exemple, à fermenter dans un silo privé d'oxygène, c'est-à-dire sans air. La biomasse y est remuée et réchauffée. Des bactéries transforment alors la biomasse en biogaz (méthane). Le biogaz est utilisé pour chauffer, pour fabriquer de l'électricité et aussi en tant que carburant.

- Les biocarburants, eux aussi produits à partir de la biomasse, sont de deux types principalement : le biocarburant essence et le biocarburant gazole.

Avec de la betterave et de la canne à sucre ainsi qu'avec des pommes de terre, du maïs et du blé, on fabrique du sucre. Grâce à la fermentation de ce sucre, on obtient ensuite de l'éthanol, que l'on peut utiliser pur ou mélangé à de l'essence pour la rallonger.

Avec les fleurs de colza et de tournesol ainsi qu'avec du soja, on fabrique un type d'huile : du biodiesel. Le biodiesel est ensuite mélangé au gazole.

La prochaine fois que tu verras passer un bus avec le sigle biogaz (feuille verte)... tu sauras qu'il roule (notamment) grâce à la fermentation des végétaux ! [35]

d. Les installations

i. La biomasse sèche

Les installations qui gèrent la biomasse sèche (surtout du bois et de la paille) sont de grandes chaudières. La biomasse sèche brûlée chauffe l'eau qui dégage de la vapeur utilisée pour faire tourner une turbine qui produit alors l'électricité.

En Suisse romande, la plus grande centrale de biomasse sèche (bois) est à Rueyres, dans le Gros-de-Vaud. Elle est située à côté d'une scierie qui travaille le bois de la région, pour fabriquer des charpentes de maison, par exemple. La centrale utilise les déchets de bois, comme l'écorce, la sciure ou les copeaux.

Elle les brûle pour produire de l'électricité et couvre ainsi les besoins de 8000 familles. Mais en plus, elle utilise aussi ces déchets pour fabriquer des pellets (sorte de boulettes de bois)... qui servent au chauffage de 5000 maisons !

b. La biomasse humide

Les installations de biomasse humide sont des usines constituées de silos ou de grandes cuves. Ces installations sont étanches à l'air et permettent le processus de fermentation de la biomasse. Elles servent à la production de biogaz et des biocarburants.

e. Biomasse au Maroc

Le Maroc dispose d'un grand gisement de biomasse à exploiter. Il s'agit essentiellement du sous bois forestier, des copeaux de bois issus de la filière de l'exploitation du bois et des scieries, les nappes alfatières, le bois de taille en arboriculture et viticulture, les tiges et les

feuilles d'après récolte d'un certains nombre de culture (Céréales, légumineuses, tournesol, betterave sucrière, canne à sucre, olivier, cultures maraîchères), les sous produits de l'agro-industrie comme, les grignons d'olives et les margines issus des 16000 moulins traditionnels et de 14 huileries modernes (40 000 tonnes d'huile d'olive sont extraites en moyenne annuellement , 160 000 tonnes pour l'année 2001), les sous produits des sucreries (13 sucreries), les coques d'amandes, les graines d'arganier et les algues marines mettant à profit les 3500 Km de côtes du Royaume sans oublier les mauvaises herbes des incultes comme les bords des sentiers, des routes, des autoroutes, des voies ferroviaires, etc.

Quant à la forêt, elle remplit un rôle économique qui se manifeste par la production de 600.000 m³/an de bois d'œuvre et d'industrie, soit 30% des besoins du pays. Elle est également à l'origine de 10.000.000 m³/an de bois de feu, participant pour 30% au bilan énergétique global. Ainsi, la forêt marocaine contribue pour près de 10% au PIB agricole national.

Cette contribution tient compte à la fois des valeurs des consommations directes réalisées dans le cadre des filières commerciales intégrées au marché et des revenus tirés directement par les populations riveraines sous forme de bois de feu, de parcours et de menu-produits divers.

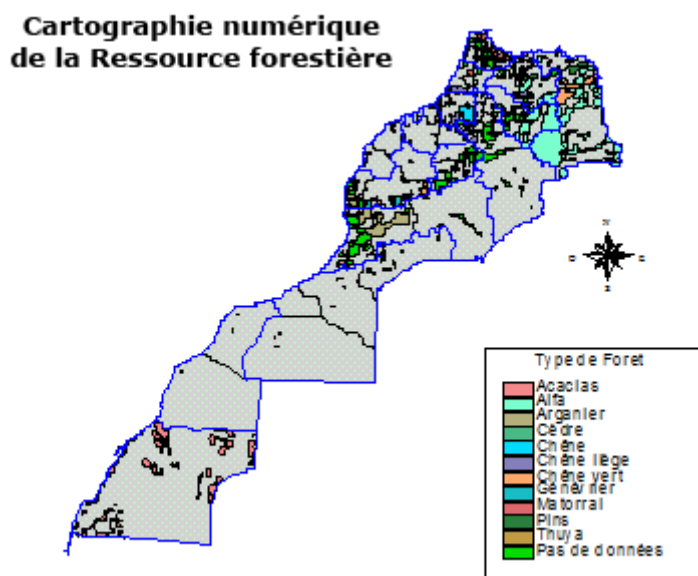


Figure 29: cartographie numérique de la ressource forestière

□ Les principales applications dans le secteur agricole

Parmi les principaux usages de la biomasse dans une ferme agricole on distingue :

i. Chauffage

Dans certaines régions, les bâtiments d'élevage doivent être chauffés. Ainsi une unité de production d'eau chaude peut être ajoutée au système de bio digestion. Elle a double fonction : la production d'eau chaude pour les besoins sanitaires et l'alimentation de boucles de chauffage.

ii. Production d'électricité

Il est possible d'ajouter une génératrice au système afin de combler une partie ou la totalité des besoins en électricité de la ferme. Le fonctionnement de cette génératrice dégage une quantité de chaleur non négligeable qu'il est possible de récupérer pour chauffer l'eau. [36]

f. Les avantages et les inconvénients

Avantages : c'est une énergie qui émet peu de gaz à effet de serre et qui peut être stockée.

Concernant particulièrement le bois-énergie, il y a une large disponibilité de la ressource et le prix du bois de chauffage ne suit pas le cours du pétrole.

Inconvénients : Elle ne peut avoir qu'un apport limité car le recours intensif à la biomasse entraînerait des impacts négatifs sur l'environnement tels que des phénomènes de déforestations (en cas d'exploitation intensive du bois-énergie), d'érosions des sols, de pollution des sols et des eaux (en cas de production intensive de biocarburant). [37]

g. Conclusion

La biomasse, énergie renouvelable mondialement connue, présente de nombreuses qualités.

En effet, son respect environnemental et sa quantité très importante font d'elle une des énergies renouvelables les plus utilisées sur notre planète. De plus, son renouvellement permet une utilisation régulière de la biomasse sans compromettre le développement des écosystèmes. Cette énergie est beaucoup moins polluante que les énergies fossiles car il n'y a pas de rejets de soufre dans les fumées et aucun impact sur l'effet de serre. [43]

Conclusion générale

Le monde consomme massivement les énergies fossiles et thermiques qui sont onéreuses et polluantes. La transition énergétique est devenue incontournable pour répondre aux besoins de plus en plus croissants en énergie et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Le Maroc, compte tenue de sa situation géographique, dispose d'une situation remarquablement favorable pour les énergies renouvelables. Le potentiel éolien est le plus prometteur avec les 3500 km de côtes avec des vents forts. En matière d'énergie solaire, le pays bénéficie d'un important rayonnement solaire surtout au sud. Les ressources en énergie hydrauliques sont en développement et il dispose de plus de 200 lieux potentiels pour des petites centrales hydroélectriques. Pour la biomasse énergie, il dispose de plus de 9 hectares de forêts.

Pour tout cela le Maroc s'est fixé un objectif audacieux d'obtenir, à l'horizon 2020, de 42% de sa consommation d'électricité à partir des énergies solaire, éolienne et hydraulique. Les projets Noor I, II et III à Ouarzazate font partie de ce programme.

Le pays prend de plus en plus conscience de l'enjeu environnemental auquel il est confronté, pour cela il doit impérativement réduire l'émission du CO₂ et atténuer ainsi la pollution atmosphérique.

Les énergies renouvelables constituent une alternative aux énergies fossiles. Elles contribuent à répondre aux besoins énergétiques actuel et futur pour soutenir une croissance durable et réduire la pauvreté.

Références

Webographie :

- [1] <http://www.fsr.um5a.ac.ma/cours/physique/bargach/chap5.pdf>
- [2] <http://www.climamaison.com/lexique/rayonnement-solaire.htm>
- [3] <http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/dico/d/climatologie-rayonnement-solaire-13785/>
- [4] http://www.lemonde.fr/afrique/article/2015/01/13/le-maroc-bientot-leader-mondial-de-l-e-nergie-solaire_4555245_3212.html
- [5] <http://www.masen.org.ma/upload/communiqués/FichesVF.pdf>
- [6] <http://www.edfenr.com/energie-solaire-photovoltaïque.html>
- [7] webgarnier.ac-noumea.nc/phyapp/solaire/doc/cours_photo.pdf
- [8] <http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/l%27energie-solaire-photovoltaïque-du-soleil-au-courant.PDF?IDR=9366>
- [9] <https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT2xHkJz5cqT2mgukaKH6Z6t6a-BOkEA3C>
- [10] <http://www.economiedenergie.com/lenergie-solaire-thermique-ou-thermodynamique>
- [11] <http://www.landes.org/files/cg40/environnement/Guide-ST.pdf>
- [12] <https://www.google.com/search?q=energie+solaire+thermique+a+haute+temperature+au+maroc&tbn=isch&tbo=u&source=univ&sa=>
- [13] http://www.energies-renouvelables.org/solaire_thermique_ht.asp
- [14] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique>
- [15] www.futur-sciences.com/magazines/environnement/info/dico/d/
- [16] www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16657
- [17] www.eolienne.comprendrechoisir.com/comprendre/éolienne-verticale
- [18] www.micro-éolienne.quotatis.fr

- (19) www.passion-météo.net/découverte/vents.htm
- (20) sites-final.uclouvain.be/e-lee/
- (21) www.connaissancedesenergies.org
- (22) www.siem.ma/potentiel-maroc
- (23) base.d-p-h.info/fr/fiches/dph/fiche-dph-7431.html
- (24) www.éolienne-particulier.info/éolienne-horizontale/
- [33] <http://jeunes.edf.com/article/qu-est-ce-que-l-energie-hydraulique.36>
- [34] <http://www.energiesrenouvelable.fr/biomasse.php>
- [35] <http://www.explorateurs-energie.com/index.php/les-energies/biomasse>
- [36] <http://www.fellah-trade.com/fr/developpement-durable/energies-renouvelables-maroc>
- [37] http://www.energiesrenouvelables.fr/avantage_inconvenient_energies_renouvelables.php
- [38] <http://www.europlasma.com/fr/energies-renouvelables.html>
- [39] <http://www.climamaison.com/lexique/energie-hydraulique.htm>
- [40] http://enrj.renouvelables.free.fr/energie_hydraulique.html
- [41] <http://pompes-hydraulique.com/aborderuneinstallationhydraulique/index.html>
- [42] <http://www.mtaterre.fr/dossier-mois/chap/843/La-biomasse,-c-est-quoi>
- [43] <http://www.energiesrenouvelable.fr/energie-hydraulique.php>
- [44] <http://les-biomasse-energie-renouvelable.e-monsite.com/pages/conclusion.html>
- (25) M. Tadili
- (26) H. Nfaoui Décembre 2004

Bibliographie :

- (27) énergie éolienne-principe-étude de cas
Auteur : Jean-Marc Noël
Editeur : Dunod 2010
- (28) L'énergie hydraulique et l'énergie éolienne
Editeur : le manuscrit amazon france
- (29) Énergie éolienne et intégration au réseau
Auteur : Brendan Fox
Éditeur : Dunod, 2009

(30) Solutions de stockage de l'énergie éolienne: rapport interne

Auteurs

Hussein Ibrahim, Adrian Ilinca, Jean Perron, Université du Québec à Rimouski.

Laboratoire de recherche du Groupe éolien

Éditeur Université du Québec à Rimouski, 2006

(31) Énergétique éolienne: applications pratiques, chauffage éolien, production d'électricité, pompage

Auteur Jean Hladik

Éditeur Masson, 1984

(32) Eoliennes et aérogénérateurs :

Auteur :Guy cunty

Edit : Edisud 2006