

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE



Mémoire de fin d'étude
Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie électrique et Electronique
Spécialité : Réseaux Electrique

Thème

**Ressources Énergétiques Renouvelables de
la planète**

Encadré par :

Azzeddine merazga

Présente par:

M. Kaid Imad-Eddine

M. Said Souid

M. Touil Boukhari

2010-2011

Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Liste des Tableaux	
Liste des Figures	
Résumé bilingue	

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------	----------

Généralités sur les énergies renouvelables et non renouvelables

I-1-Introduction	3
I-2- Les énergies non renouvelables	3
I-2-1- Le pétrole et le gaz	3
I-2-2- L'énergie nucléaire	4
I-3- Les énergies renouvelables.....	4
I-3-1- L'eau.....	5
I-3-1-1- L'hydroélectricité.....	5
I-3-1-2- L'énergie des marées.....	6
I-4- L'énergie des vagues.....	6
I-5- Biomasse et déchet.....	7
I-5-1- Le bois.....	7
I-5-2 -Déchets organiques et bio gaz.....	7
I-6- Ethanol et bio diesel	8
I-6-1- Ethanol.....	8
I-6-2- Le Biodiesel	8
I-7- Le vent.....	8
I-8- L'énergie solaire.....	9
I-8-1- Le solaire à utilité domestique	9
I-8-2- L'énergie photovoltaïque	9
I-9-Répercussions environnementales de différentes sources d'énergie	10
I-9-1- Le pétrole.....	10
I-9-2-Le charbon	10
I-9-3-Le gaz naturel	10
I-9-4-L'énergie nucléaire	10
I-9-5-Énergie hydroélectrique	11
I-9-6-Énergie du vent et du Soleil.....	11
I-9-7-Énergie géothermique	11
I-9-8-Énergie verte de la biomasse	11
I-10-L'intérêt des énergies renouvelables.....	11
I-10-1- Intérêt Economique.....	12
I-10-1-1-Une ressource renouvelable	12
I-10-1-2- Une ressource locale pour un développement local	12
I-10-1-3-Aspect financier.....	12

No table of contents entries found.

No table of contents entries found.

No table of contents entries found.

No table of contents entries found.

No table of contents entries found.

IV-1- Introduction	51
IV-2- Les différents types d'ouvrages hydrauliques	52
IV-2-1- Les bassins versants et le stockage naturel de l'eau	52
IV -2-2- Les différents types d'aménagements hydrauliques	52
IV- 2-2-1- les aménagements avec retenue	52
IV -2-2-2-les aménagements "au fil de l'eau"	53
IV- 2-2-3-les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)	53
IV -2-2-4-Les différents types de turbines.....	54
IV -3 - La grande hydraulique	56
IV-3-1 Situation en 2000.....	56
IV-3-2 - Avantages et inconvénients	57
IV-3-2 -1-pour l'environnement	57
IV-3-2 -2-pour la santé	58
IV-3-2 -3-sociaux.....	59
IV-3-3 - Grande hydraulique et risques industriels	59
IV-3-4 -Grande hydraulique et réseau de transport d'électricité	60
IV-3-4 -1-Le transport de l'électricité	60
IV-3-4 -2-Le soutien au réseau	62
IV-3-5- Economie	62
IV-3-6 Potentiel et perspectives de développement	62
IV-4 - La moyenne hydraulique	63
IV-5 - La petite hydraulique	64
IV-5-2 - Avantages et inconvénients	65
IV-5-2 -1-Les avantages et inconvénients pour l'environnement.....	65
IV-5-2 -2-Les avantages sociaux	66
IV-5-3-Petite hydraulique : une production décentralisée	66
IV-5-4 -Perspectives de développement.....	66
IV-5-4 -1-Une réglementation européenne très volontariste pour le développement de l'énergie renouvelable	66
IV-5-4 -2-Des tarifs d'achat incitatifs.....	67
IV-5-4 -3-Les facteurs limitants	68

IV-5-4 -4-La contribution de la petite hydraulique aux objectifs de production d'électricité d'origine renouvelable	69
IV-6-Conclusions.....	70

Chapitre V : Autres formes d'énergies renouvelables

V-1-Introduction.....	71
V-2-Énergie géothermique.....	71
V-3- Énergie marine.....	74
V-3-1- Énergie de la houle.....	74
V-3-2- Énergie marémotrice.....	74
V-3-3- Énergie thermique des mers	75
V-4- Énergie de biomasse ou bois-énergie	77
V-5-Biométhane ou biogaz.....	78
V-6- Biocarburant	79
V-7- Conclusion	80

CONCLUSION GENERALE	82
Bibliographies.....	83
Annexe	85

Dédicace

*Nous dédions ce travail à nos parents qui nous
ont soutenus dans notre étude, donc nous sommes
arrivés à cet endroit. et aussi à nos collègues de
l'étude et nos professeurs du Centre de
l'Université D'el oued .*

Remerciement

Merci à dieu tout puissant qui nous a éclairé le bon chemin et qui nous a tant donné comme volonté, santé et surtout patience pour pouvoir durant toute ces longue années d'étude d'arriver à ce niveau et de concrétiser nos effort par ce modeste travail.

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements pour sa collaboration son soutien moral ,à notre encadreur **Mr:** Azzedine merazga, pour nous avoir suivies durant la préparation de ce travail et pour son aide si précieuse, ces nombreux conseils et suggestions .*

Les collègues de la première promotion de notre spécialité à leur soutien que dieu les aide dans leur vie professionnelles,

Nos familles respectueuses à leur soutien matériel et moral, et l'atmosphère qui nous ont présenté,

Remerciement spécial aux responsables du centre universitaire D'El-Oued et a tous ceux-là nous présentons nous remerciements et nos respect

SAÏD ,IMAD-EDDINE ET BOUKHARI



Liste de tableaux

<i>Tableau III-1</i> la différent effet de vent en fonction de vitesse.....	43
<i>Tableau IV-1</i> Situation en 2000.....	56-57
<i>Tableau IV-2</i> Potentiel et perspectives de développement.....	63
<i>Tableau IV-3</i> DGEMP : objectifs de la France pour l'électricité renouvelable..	67
<i>Tableau IV-4</i> La contribution de la petite hydraulique aux objectifs de production d'électricité d'origine renouvelable	69

Liste des figures

Figure I-1 Réaction de fission nucléaire	4
Figure I-2 schéma simplifié d'une centrale hydroélectrique	6
Figure II-1 spectre du rayonnement solaire: AM0 (extraterrestre) et AM1.5 (épaisseur de 1.5 atmosphère, correspondant à une hauteur du soleil de 48° au niveau de la mer).....	17
Figure II-2 la transformation directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique.	19
Figure II-3 schéma équivalent d'une cellule solaire	22
Figure II-4 caractéristique $I=f(V)$ du moule solaire	23
Figure II-5 caractéristique puissance – tension.....	24
Figure II-6 effet de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ du générateur PV.....	25
Figure II-7 effet de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$ du générateur PV....	25
Figure II-8 effet de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ du générateur PV	26
Figure II-9 effet de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ du générateur PV.....	26
Figure II-10 effet simultané de la température et l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ du générateur PV.....	27
Figure II-11 effet simultané de la température et l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$ du générateur PV	27
Figure II-12 schéma de connexion des cellules solaires en série [a] et $I=f(V)$	28
Figure II-13 schéma de connexion des cellules solaires en parallèles [a] et caractéristique $I=f(V)$	29
Figure III-1 Eolienne à axe verticale.....	33
Figure III- 2 Effet du vent sur un corps creux.....	33
Figure III- 3 Rotor de Savonius.....	34
Figure III-4 Différents types de rotor de Darrieus.....	35
Figure III-5 Eolienne à axe verticale.....	36

Figure III-6 Composantes d'une éolienne	36
Figure III-7 Eléments de la nacelle de vitesse du vent En fonction du relief rencontré et de l'altitude	39
Figure III- 8 Répartition de vitesse du vent En fonction du relief rencontré et de l'altitude	44
Figure III -9 Courbe vitesse-durée et Courbe de fréquence	46
Figure III- 10 Comportement d'une pale dans un flux	47
Figure III-11 Représentation du tube de courant	48
Figure III -12 Classement des types d'éolienne	49
Figure III-13 Création de tourbillon	50
Figure IV-1 Turbine Pelton	54
Figure IV-2 Turbine Français	55
Figure IV-3 Turbine Kaplan	55
Figure IV-4 le centrale de haute chute	56
Figure IV-5 le centrale de moyenne	64
Figure IV-6 le centrale de basse	64
Figure V-1 Principales utilisations de la géothermie en fonction des températures (Tiré de ADEME-BGRM, 2007)	73
Figure V-2- Vision artistique d'une hydrolienne munie de 2 rotors (Projet Marine Current Turbines Lt	76

Introduction générale

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du XVIIIe siècle, puis du pétrole au milieu du XXe siècle. Après le premier choc pétrolier de 1973, l'Europe opte pour une nouvelle énergie, le nucléaire, contrairement aux autres pays du globe qui continuent d'exploiter les ressources fossiles en priorité. Celles-ci nous dit-on, s'épuisent, alors que les menaces sur le climat sont pour une grande part dues à leur utilisation et que la consommation d'énergie ne cesse d'augmenter. Les énergies renouvelables apparaissent dans ce contexte une alternative intéressante pour préserver à la fois le confort des êtres humains et la qualité de l'air.

Une énergie renouvelable est une énergie qui est considérée comme telle à l'échelle de quelques générations humaines ; en fait les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels, réguliers ou constants, provoqués par les astres.

Le Soleil est à l'origine de nombreuses énergies renouvelables. Son rayonnement constitue en lui-même une énergie exploitable. Ce rayonnement donne aussi naissance à d'autres formes d'énergie, ainsi le cycle de l'eau permet de créer de l'hydroélectricité, le vent est aussi exploité. La photosynthèse a aussi comme origine le soleil, elle crée différents matériaux exploitables énergétiquement, mais pas toujours renouvelables. La chaleur interne de la Terre est source d'énergie considérée comme renouvelable, la géothermie. La rotation des astres, système Terre-Lune, engendre des mouvements d'eau à la surface de la Terre, mouvements exploitables énergétiquement via l'énergie marémotrice. Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le pétrole ainsi que tous les combustibles fossiles ne sont pas des énergies renouvelables, les ressources étant consommées à une vitesse bien supérieure à la vitesse à laquelle ces ressources sont naturellement créées.

Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales, génèrent des emplois. Le solaire (solaire photovoltaïque, solaire thermique),

l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont des énergies flux inépuisables par rapport aux « énergies stock » tirées des gisements de combustibles fossiles en voie de raréfaction : pétrole, charbon, lignite, gaz naturel. Entrez dans l'univers des énergies renouvelables : Quelles sources d'énergies ? Pour quels besoins ? Comment les capter, les transformer ? Sous quelle forme les utiliser ?

Pour répondre à ces questions, ce travail va être concentré sur ces différentes formes d'énergies renouvelables en étudiant chaque type en détail dans un chapitre indépendant.

Ce mémoire sera structuré comme suit :

- Une introduction générale
- Chapitre1 : généralités sur les énergies renouvelables,
- Chapitre2 : énergie solaire,
- Chapitre3 : énergie éolienne,
- Chapitre4 : énergie hydraulique ;
- Chapitre5 : autres formes d'énergie renouvelables ;
- Une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables et non renouvelables

I-1-Introduction

Il est clair que l'énergie est de par tout ce qu'elle permet un véritable confort et une des causes du développement d'un pays. Ainsi, c'est en partie sur les ressources énergétiques d'un pays que repose l'économie de celui-ci. Il est clair que sans ressource énergétique viable, une entreprise aura d'autant plus de mal à se développer.

Toutefois, cela révèle un autre problème : Pour faciliter leur développement, certains pays font appel à des sources d'énergie plus ou moins polluantes tandis que d'autres plus développés souhaitent favoriser le développement de ressources moins polluantes par peur, par exemple, d'une augmentation des effets néfastes de l'effet de serre (causé majoritairement par l'émission de gaz carbonique par les sociétés et les véhicules à essence), ou encore des pollutions à l'ozone. Ainsi, alors que les énergies prédominantes sont le pétrole et le nucléaire, la recherche tant publique que privée se tourne vers des énergies plus renouvelables comme, par exemple, les piles à combustibles. D'ailleurs, même si ces recherches peuvent paraître du point de vue de leur progression industrielle dérisoires, elles n'en restent pas moins primordiales. Les réserves de pétrole sont estimées à 45 ans, celles de gaz à 65 ans, celles de charbon à 250 ans et celles d'uranium à une quarantaine d'années (pour un coût de production inférieure à 80 \$ par kg).

Il est donc étudié dans ce chapitre les différentes sources d'énergie avec pour chacune d'entre elles, l'exposé de leurs atouts et de leurs faiblesses.

I-2- Les énergies non renouvelables

I-2-1- Le pétrole et le gaz

Le pétrole et le gaz se sont formés du fait de la décomposition des végétaux préhistoriques dans des conditions particulières et représentent de nos jours les sources d'énergies les plus exploitées. Du pétrole distillé est obtenu l'essence, le bitume et d'autres produits chimiques très intéressants. Même les polymères de type plastique ou polystyrène trouvent leurs origines chimiques dans les produits dérivés du pétrole.

Toutefois, la combustion du gaz ou du pétrole induit l'émission d'importantes doses de dioxyde de carbone qui augmentent l'effet de serre et donc la température à la surface de notre planète. Alertés, Plusieurs pays et compagnies pétrolières ont lancé plusieurs programmes de recherche notamment pour la mise au point d'énergies alternatives comme par exemple, les piles à combustibles dont le principe de fonctionnement s'appuient sur la

combustion du hydrogène ($H_2+O_2\rightarrow H_2O$). Néanmoins, cela suppose une production de hydrogène et un stockage viable de ce gaz explosif.

Finalement, de part les difficultés que représentent l'établissement d'énergies alternatives, le pétrole ne trouve pas encore d'équivalent bien que de nombreuses énergies renouvelables sont en progrès.

I-2-2- L'énergie nucléaire

L'électricité produite en France est à 75% d'origine nucléaire. C'est donc une source importante qui trouve son origine avec les noyaux lourds instables (tels que l'uranium) de notre planète qui tendent à se fissionner. L'énergie dégagée lors d'une fission nucléaire peut donc être récupérée afin de produire de la vapeur d'eau qui peut entraîner une turbine et donc produire de l'électricité.

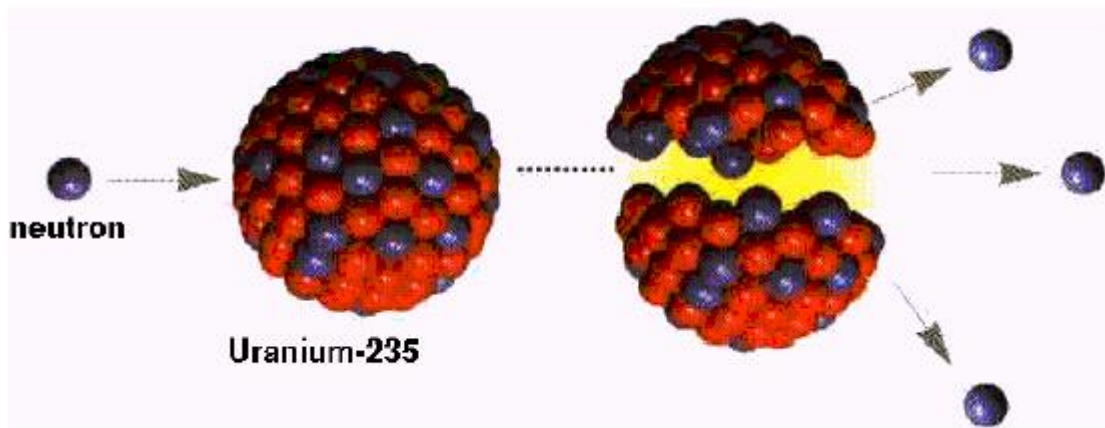


Figure I-1 Réaction de fission nucléaire

I-3- Les énergies renouvelables

Contrairement aux combustibles fossiles (pétrole, gaz...) et à l'uranium qui sont qualifiés d'énergies de « stocks », les énergies renouvelables correspondent à des énergies de « flux » car en perpétuel renouvellement. D'ailleurs, celles-ci sont d'autant plus importantes que par définition les énergies non renouvelables sont condamnées à être épuisées si bien qu'un jour ou l'autre, l'homme va être amené à, soit rechercher et utiliser de nouvelles énergies de stocks (mais là encore seulement pour un certain temps), soit à développer l'utilisation des énergies renouvelables que sont l'eau, la biomasse (bois et déchets), le vent et le solaire.

I-3-1- L'eau

I-3-1-1- L'hydroélectricité

La filière hydraulique représente 6% des ressources énergétiques mondiales ce qui correspond à la seconde source d'énergie renouvelable dans le monde et la première en France avec près de 67 TWh produit en 1998. Ce chiffre correspond majoritairement à la production d'hydroélectricité après fabrication de barrages et les cinq plus grands pays producteurs sont le Canada, les Etats-Unis, l'ex- URSS, le Brésil et la Chine, qui bénéficient d'immenses bassins versants comme la Norvège dont toute l'électricité est d'origine hydraulique.

Plus particulièrement, le principe en est simple : La force motrice de l'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique (système comparable à une dynamo). Ensuite, l'électricité obtenue peut être soit utilisée directement ou stockée en batteries, soit injectée dans le réseau de distribution. Plus précisément, une centrale hydroélectrique produit une puissance électrique proportionnelle au débit de l'eau et à la hauteur de chute. Ainsi une même puissance peut aussi bien résulter d'un faible débit d'eau tombant d'une forte hauteur, que d'un fort débit tombant d'une faible hauteur. Ainsi, les installations hydroélectriques comportent des barrages qui servent à créer tout ou Une partie de la hauteur de chute. En France, 131 barrages permettent une production importante d'électricité.

Toutefois, une telle production d'électricité peut présenter une importante faiblesse qui est en fait sa grande dépendance à des conditions climatiques assez imprévisibles. En effet, une année peut connaître la sécheresse et une autre l'inondation. Ainsi, l'eau doit être stockée dans des réservoirs, situés en amont de la centrale, que l'on décharge en cas de manque d'eau. Ainsi, il faut aménager des bassins de rétention en plus de la mise en place d'un barrage ce qui implique des modifications de l'écosystème relativement importante. Mais, l'hydroélectricité reste un avantage puisque cette méthode n'induit aucun déchet dans l'eau et aucune émission de gaz polluant.

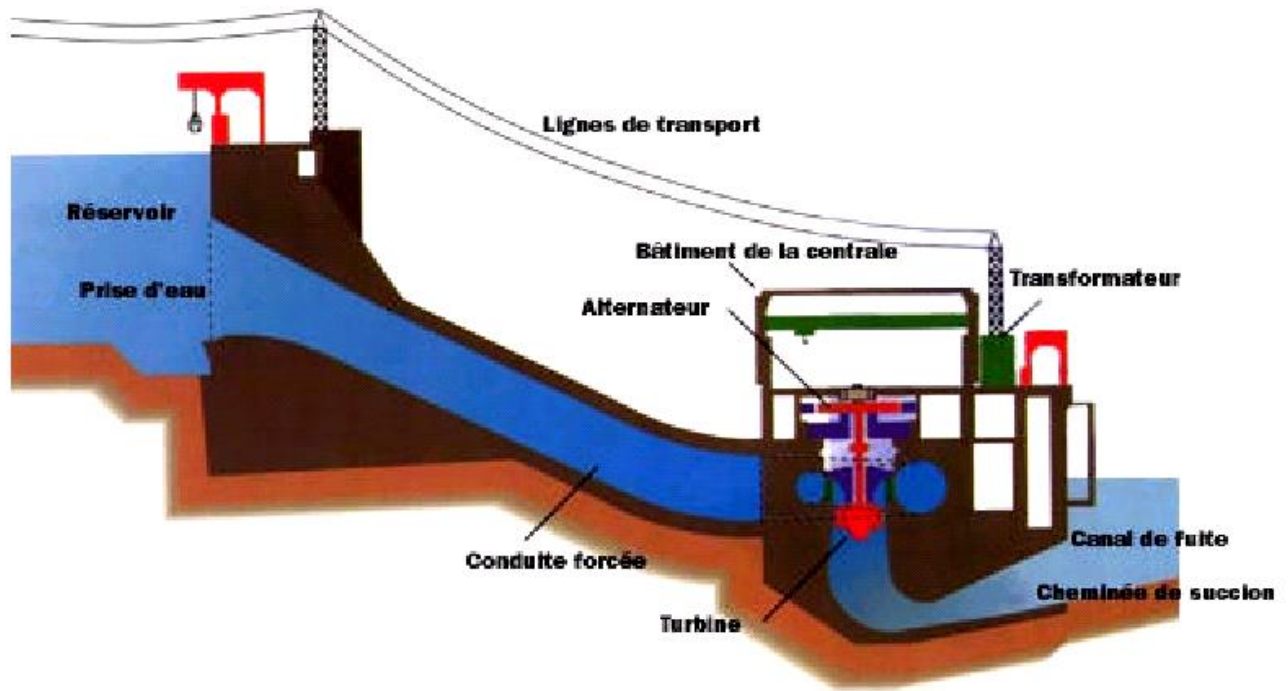


Figure I-2 schéma simplifié d'une centrale hydroélectrique

I-3-1-2- L'énergie des marées

Bien que variable, l'amplitude des marées peut être forte près des côtes (jusqu'à dépasser parfois les dix mètres) ce qui rend la construction de barrages pour usine marémotrice possible.

Du point de vue du principe, une centrale marémotrice ne correspond en fait qu'à une adaptation des centrales hydroélectriques. En effet, lorsque la mer monte, l'eau envahit un bassin dont le rôle est de retenir l'eau afin que sa libération puisse ensuite se faire après passage dans une turbine.

Plus particulièrement, ce type de centrale est récent mais son coût de fabrication reste très attractif. Par exemple, l'usine marémotrice de l'estuaire de la Rance, à l'Ouest du Mont St Michel Permet d'obtenir une puissance seulement 3.5 fois inférieure à celle d'un réacteur nucléaire de 900 MW dont le coût de fabrication est 16 fois plus élevé.

I-4- L'énergie des vagues

En ce qui concerne cette énergie, son développement est beaucoup moins avancé que pour les marées et il est encore trop tôt pour juger du devenir d'une telle énergie. Depuis les années 1970, plusieurs dispositifs ont été expérimentés dans divers pays comme le Japon ou la Grande-Bretagne et aujourd'hui, pour un mètre de côte ouest de l'Atlantique Nord, il est estimé qu'environ 90 kW pourraient être produits.

I-5- Biomasse et déchet

La biomasse qui désigne l'énergie issue des matières organiques est très importante et représente près de 14% de la consommation énergétique mondiale. Elle comprend le bois (issu des forêts, des industries du bois ou bois de rebut), le bio gaz (que dégage une fermentation de déchets organiques) et les biocarburants pour véhicules (type alcool de colza).

I-5-1- Le bois

Le bois est la plus ancienne énergie renouvelable utilisée et est très répandue en France avec près de 14 millions d'hectares de forêt permettant de couvrir 4.5 % des besoins énergétiques. C'est la plus importante source d'énergie renouvelable après l'hydraulique.

De nos jours, la moitié des maisons individuelles françaises utilisent du bois de chauffage, et près du quart consomme du bois en chauffage de base. Les maisons construites avec chauffage électrique sont souvent devenues des maisons chauffées au bois et un peu à l'électricité, quand on n'a pas tout simplement débranché les convecteurs électriques. Les centrales thermiques peuvent fonctionner également au bois mais cela reste peu répandu bien que de telles installations n'augmentent pas l'effet de serre du fait que les doses de dioxyde de carbone relâchées sont ensuite impliquées dans le processus de replantation des forêts.

I-5-2 -Déchets organiques et bio gaz

En l'absence d'oxygène, la fermentation de matières organiques contenues dans des déchets d'origine urbaine, agricole ou industrielle produit un gaz composé à plus de 50% de méthane semblable au gaz naturel.

Ainsi, les déchets fermentent dans une citerne, appelée digesteur, légèrement chauffée (à 35°) grâce à une partie du biogaz produit. Contrairement à la fermentation à l'air libre, la fermentation en l'absence d'air, dite 'anaérobie', dégage très peu de chaleur. Plus particulièrement, un tel dispositif permet d'obtenir plus de 100 m³ de biogaz par tonne d'ordures ménagères brutes entrant à l'usine, avec une teneur en méthane moyenne de 55 %. Ensuite, après épuration préalable du gaz pour le débarrasser de son eau, du gaz carbonique (CO₂) et de l'hydrogène sulfuré (H₂S), le bio gaz peut produire de la chaleur, servir de carburant pour véhicules ou être injecté dans le réseau de gaz naturel.

Plus particulièrement, il est estimé que le bio gaz valorisation pourrait représenter entre 10 et 20 % de notre consommation de gaz naturel alors que la quantité valorisée actuellement est seulement de 0,5 %. Il pourrait être réalisées 50 à 100 000 installations de fermentation qui produiraient une moyenne de 10 m³/heure, soit 100 kWh. Il en existe moins de 10, contre plus de 1000 en Allemagne où cette filière est en plein essor.

I-6- Ethanol et bio diesel

I-6-1- Ethanol

La fermentation des plantes riches en sucres comme la betterave et la canne à sucre, ou en amidon comme le blé ou le maïs produit de l'éthanol ainsi qu'un éther dérivé : l'éthyl-tertio-butyl-éther (ETBE). A titre d'exemples, un hectare de betteraves produit environ 6500 litres d'éthanol et, au Brésil, près de quatre millions de voitures roulent à l'éthanol fabriqué à partir de canne à sucre. D'ailleurs, cela n'est pas surprenant du fait que l'utilisation d'éthanol en tant que carburant ne nécessite aucune adaptation des véhicules et des moteurs.

I-6-2- Le Biodiesel

Le bio diesel est un ester produit par ajout d'alcool à partir d'huiles qui peuvent être des huiles végétales (principalement de colza), mais aussi des huiles de cuisson ou même des graisses animales.

Un hectare de colza fournit environ 1300 litres d'ester. Le bio diesel a un meilleur rendement que l'éthanol et son impact en matière d'effet de serre est 4 à 5 fois inférieur au gazole.

Finalement, après étude des diverses phases telles que la culture, la fabrication industrielle et l'utilisation, le bilan des effets environnementaux de ces biocarburants s'avère positif puisqu'ils permettent entre autre des émissions moindres d'oxydes de soufre, de particules et d'oxydes de carbone que les carburants pétroliers.

I-7- Le vent

De la même façon que le vent actionnait les pales des moulins à eau ou à blé, le vent peut actionner les pales d'une hélice et ainsi entraîner un système équivalent à une dynamo appeler aérogénérateur. L'ensemble « pales + aérogénérateur » est plus particulièrement appelé « éolienne » (du grec Eole, dieu du vent) et correspond à une haute tour (le vent soufflant davantage en hauteur) en béton ou en métal, au sommet de laquelle tourne une hélice (généralement de 30 à 40 mètres de diamètre) comportant trois pales. D'ailleurs, le diamètre de l'hélice se doit d'être important du fait que la puissance théorique d'une éolienne croît proportionnellement au carré du diamètre des pales et au cube de la vitesse du vent.

Aussi, l'électricité éolienne est l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses et pour cause puisqu'elle est également la moins coûteuse des énergies renouvelables. Toutefois, tous les sites ne peuvent pas forcément inclure des éoliennes du fait que la vitesse moyenne du vent doit dépasser les 5 mètres par seconde soit 18 Km par heure. De nos jours, les

machines les plus courantes ont une puissance de 750 kW et les plus puissantes commercialisées atteignent 1,5 MW.

I-8- L'énergie solaire

Chaque jour, le soleil envoie sur la terre l'équivalent de 78 milliards de réacteurs nucléaires et il ne peut donc qu'être intéressant de convertir cette énergie en chaleur ou en électricité.

I-8-1- Le solaire à utilité domestique

Le Soleil peut tout simplement permettre le chauffage de liquide de différentes compositions contenues dans des systèmes permettant aussi une circulation de ce fluide à l'intérieur même d'éléments domestiques tels que le chauffe-eau ou le plancher ce qui permet un chauffage uniforme dans toute la maison. Néanmoins, un tel chauffage n'est pas d'utilisation très répandue du fait qu'il dépend très fortement de l'ensoleillement en journée ce qui induit la présence d'une énergie en parallèle pour répondre au besoin de chauffage à toutes les saisons.

I-8-2- L'énergie photovoltaïque

Lorsque les photons (particules de lumière) frappent certains matériaux, ils délogent et mettent en mouvement des électrons, provoquant ainsi un courant électrique. Les cellules solaires (ou photopiles) sont constituées de silicium, qui est un élément très répandu dans la nature (28 % de l'écorce terrestre), sous sa forme oxydée (silice). Aussi, pour obtenir la tension désirée (en volts), on monte de nombreuses cellules en série dans des panneaux rectangulaires dits 'modules photovoltaïques', eux -mêmes mis en série. Pour obtenir la puissance souhaitée (en kilowatts), on installe des séries en parallèle.

D'autre part, le photovoltaïque est un domaine scientifique encore récent, datant d'une vingtaine d'années, doté d'un fort potentiel d'amélioration, en particulier en matière de rendement de conversion des cellules et les coûts de fabrication ne cessent de diminuer (le prix des modules PV a déjà été divisé par trois en 20 ans).

Ainsi, l'utilisation de telles cellules pour produire de l'électricité reste du niveau de l'innovation mais des solutions alternatives font l'objet d'étude ou sont pour certaine déjà exploitées. Par exemple, il a été construit des centrales solaires constitués de miroirs afin de concentrer les rayons solaires en un point au niveau duquel est placée de l'eau qui va donc chauffer, permettre la production de vapeur et donc la rotation d'une turbine.

Un autre projet (Projet d'une héliocentrale orbitale (Nasa)) consiste en une centrale solaire « spatiale » d'une puissance entre 5000 et 10 000 MW et d'un coût estimé à 60

milliards de dollars. Le rayonnement solaire serait recueilli par deux panneaux photovoltaïques de 3 Km ´ 5 Km, fournissant une tension continue de 20 000 volts. L'énergie serait elle transmise à la terre par pinceau d'ondes, le terminal terrestre étant une antenne de 10 km.

I-9-Répercussions environnementales de différentes sources d'énergie

I-9-1- Le pétrole

Le dioxyde de carbone libéré en brûlant des Combustibles fossiles, y inclus le pétrole, contribue à l'effet de serre. D'autres gaz ainsi libérés sont toxiques ou cancérigènes (ex., monoxyde de Carbone, hydrocarbures imbrûlés, benzène, etc.). Les transformations chimiques subséquentes de ces gaz produisent de l'ozone et des oxydes d'azote. Le transport du pétrole représente un danger pour l'environnement, surtout lorsque le naufrage d'un navire-Citerne entraîne un immense déversement. Certaines recherches sont en cours dans le but d'en augmenter l'efficacité et d'en réduire les émanations.

I-9-2-Le charbon

Les gaz libérés par la combustion de charbon contribuent à l'effet de serre (le dioxyde de Carbone) et aux pluies acides qui endommagent les lacs, les forêts, les récoltes et les édifices. On peut déjà contrôler efficacement les émissions de gaz acides. On cherche aussi d'autres moyens pour réduire les autres émanations dangereuses pour l'environnement telles que le dioxyde de carbone. L'exploitation du charbon par des mines à ciel ouvert a aussi un impact important sur l'environnement immédiat.

I-9-3-Le gaz naturel

C'est le combustible qui est actuellement le plus inoffensif qui soit pour l'environnement, car il dégage, lors de sa combustion, moins de dioxyde de carbone (bien qu'il en dégage une certaine quantité) et d'autres gaz nocifs. La construction et la présence subséquente des importants réseaux de pipelines a un impact sur l'environnement immédiat.

I-9-4-L'énergie nucléaire

La production de déchets radioactifs à longue vie (c.-à-d., des milliers d'années) -- sous la forme de restes des faisceaux de combustible et de restes des centrales nucléaires périmées et démontées dont l'espérance de vie actuelle est d'environ 40 ans -- crée des problèmes environnementaux. L'avantage du combustible nucléaire, c'est son faible encombrement. Il suffit d'un combustible nucléaire de la taille d'un ballon de volley-ball pour produire toute

l'énergie consommée par un Canadien durant sa vie entière! Et il n'y a pas de pollution de l'atmosphère.

I-9-5-Énergie hydroélectrique

L'inondation de vastes territoires représente un problème sérieux de perturbation des écosystèmes. Dans les nouveaux réservoirs, des réactions chimiques provoquent la libération du mercure qui se trouve naturellement dans le sol. L'utilisation de BPC comme isolant dans les transformateurs est interdit depuis les années 1970, mais il représente encore un grave danger pour l'environnement.

I-9-6-Énergie du vent et du Soleil

Les fermes éoliennes et les réseaux de piles solaires prennent de l'espace et peuvent entraîner une pollution visuelle du paysage. Ce sont néanmoins des formes «propres» d'énergie (aucune production de déchets).

I-9-7-Énergie géothermique

La libération éventuelle de gaz ou d'eau contenant des produits toxiques, à partir de gisements souterrains, représente un problème pour l'environnement. Il existe également une pollution sonore (dégagement de vapeur sous pression élevée). Ce même dégagement de chaleur entraîne d'importants changements climatiques locaux.

I-9-8-Énergie verte de la biomasse

Une mauvaise utilisation des plantes et des arbres (forêts, tourbe, etc.) risque de rendre le sol stérile sous l'effet d'un ruissellement accru et d'une érosion due au vent. La combustion de matières végétales produit du dioxyde de carbone qui, libéré dans l'atmosphère, provoque le réchauffement de la planète. L'énergie verte de la biomasse est également associée à une réduction de la quantité de plantes pouvant absorber le dioxyde de carbone, ce qui cause un accroissement de l'effet de serre.

I-10-L'intérêt des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables qui se définissent comme celles dont la source ne peuvent se tarir, possèdent un certain nombre d'atouts aussi bien financiers qu'environnementaux.

Parmi les énergies renouvelables, on comprend :

L'énergie hydraulique, tirée des cours d'eau et des océans ;

L'énergie solaire thermique, pour la production de chaleur ;

L'énergie solaire photovoltaïque pour la production d'électricité ;

L'énergie éolienne, utilisant l'énergie du vent pour le pompage ou la production d'électricité ;

La géothermie qui exploite la chaleur accumulée dans le sous-sol ;

La biomasse, qui utilise l'énergie issue de la fermentation ou de la combustion de matières végétales (bois, déchets organiques...)

I-10-1- Intérêt Economique

I-10-1-1- Une ressource renouvelable

Le principal atout des énergies solaires, éolienne et hydraulique est d'être renouvelable.

Pas de risque de pénurie, de rupture de stock.

La matière première (sauf pour le bois) est gratuite.

I-10-1-2- Une ressource locale pour un développement local

Ce sont des ressources locales offrant une autonomie énergétique appréciable en zone montagneuse ou dispersée compte tenu des risques inhérents à l'approvisionnement en énergies fossiles ou non raccordement au réseau électrique (intempéries, neiges pouvant couper routes ou lignes électriques, absence de réseau).

L'utilisation d'énergies renouvelables offre une disponibilité nouvelle d'énergie dans les zones rurale et de montagne en cours de désertification depuis plusieurs décennies conduit à reconsidérer certaines orientations de l'aménagement du territoire. Elle permet d'envisager la réalisation de projets agricoles ou touristiques, qui faute de pouvoir obtenir de façon classique (réseau, énergies fossiles...) l'énergie nécessaire à leur fonctionnement, ne pouvaient se développer voire étaient abandonnés. L'utilisation et l'exploitation optimale du bois énergie par l'utilisation des déchets de bois comme combustible par exemple offre de nouveaux débouchés pour les bois de rebut, les branchages...

I-10-1-3- Aspect financier

L'évaluation financière à cette échelle, ne peut être faite sous le seul angle de l'investissement énergétique mais doit tenir compte des bénéfices induits : emplois, commerces, nouveaux débouchés...

Par ailleurs, tous ces équipements sont destinés à être utilisés sur de longues périodes (20 à 50 ans). Nul ne sait quelle sera la situation énergétique à cette échéance. L'usage des énergies renouvelables permet de s'affranchir de l'incertitude de l'évolution du marché des énergies fossiles (le coût de ces énergies, actuellement bas, est amené à monter à moyen terme).

Le coût des systèmes ne peut aller qu'en s'abaissant avec leur développement (Prévision de division par 3 du coût des systèmes photovoltaïques d'ici à l'an 2010).

Le coût de maintenance (généralement faible) est connu à l'avance et l'approvisionnement en ressource primaire est indépendant des variations du marché de l'énergie (pour cause de gratuité !).

Elles ne génèrent pratiquement pas de pollutions :

Pas de gaz à effet de serre ;

Peu ou pas de déchets (aussi bien dans l'environnement immédiat que sur le reste de la planète) ; Pas de nuisances sonores ; Pas de nuisances olfactives

Très faibles nuisances visuelles (en comparaison de l'infrastructure nécessaire aux autres énergies)

Pas d'infrastructures (lignes, poteaux, transformateurs...) dans les zones sensibles et protégées (sites classés, parcs naturels régionaux, nationaux),

Pas de trouées dans les forêts et autres paysages, pas d'entretien de lignes...

I-11-Conclusion

Il existe donc un nombre considérable d'énergies mais certaines restent très difficiles d'exploitation surtout qu'elles présentent toutes un certain inconvénient. Toutefois, il est clair que les énergies de demain se doivent d'être les moins polluants possibles afin de préserver l'écosystème de la planète.

Dans ce chapitre on a représenté les différents types d'énergie (les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables) par la suite on va étudier en détail chaque type d'énergie dans des chapitres séparés .

Chapitre II : Energie solaire

II-1- Introduction

Nous allons, dans ce qui suit, aborder le cœur du phénomène photovoltaïque : la conversion de la lumière en électricité.

Le mot «photovoltaïque» vient du grec « photos » qui signifie lumière et de «Volta» le nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique. Mais c'est le Savant français, Antoine Becquerel qui, en 1839, mit en évidence cette conversion particulière de l'énergie: la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière [1].

II-2- L'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le soleil [2].

II-2-1- Historique de l'énergie solaire

- Socrate (470-399 avant JC), philosophe grec qui a enseigné la construction bioclimatique (entre autres choses).
- Lorsque Syracuse fut assiégée par la flotte romaine, en 209 avant JC, pendant la deuxième guerre punique, on attribue à Archimède (en 287-212 avant JC) l'invention d'un moyen d'incendier les navires ennemis en concentrant sur eux les rayons du soleil grâce à un jeu de miroirs.
- Antoine Becquerel (1788-1878) inventa la pile photovoltaïque en 1839.
- Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), chimiste, il inventa un four solaire utilisant des lentilles convergentes afin de fondre des métaux sans la pollution des combustibles.
- Horace Bénédict de Saussure (1740-1799), physicien suisse, inventa la "boîte chaude" en 1767 afin de démontrer l'effet de serre. Il est considéré comme le précurseur du capteur solaire plan.
- Charles Vernon Boys (1855-1944), physicien anglais, inventa un capteur cylindro-parabolique, qui a été mis en oeuvre pour la première fois en 1912.
- Félix Trombe (1906-1985), chimiste français qui a fait construire des fours solaires à Mont Louis et à Odeillo dans les Pyrénées, comme laboratoires du CNRS. Il a développé les systèmes passifs de chauffage solaire et notamment le "mur Trombe" [3].

II-2-2- Rayonnement solaire

Le soleil reste jusqu'à présente la plus importante source d'énergie Malgré la distance considérable qui le sépare de la terre ($150 * 10^6$ de kilomètres). La puissance émise par le soleil

sous forme de rayonnement est estimé à $390 \cdot 10^{15}$ GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que $180 \cdot 10^6$ GW [4],[8]. Arrivant à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux phénomènes d'absorption et de diffusion. De là, on introduit la notion de l'éclairement comme étant la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteinte 1 kW/m^2 pour un site situé au niveau de la mer.

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires [4].

II-2-3- Caractéristique rayonnement solaire

Il y a cinq caractéristiques de rayonnement solaire :

II-2-3-1- Énergie renouvelable

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et de chaleur, elle est à l'origine de la biomasse (photosynthèse), du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques, et sous forme stockée durant des millions d'années, de nos réserves de gaz, de pétrole et de charbon [5], [6].

L'énergie du soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaire : les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (2 protons + 2 neutrons). Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétique (lumière) [6].

II-2-3-2- Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

Sur la surface terrestre, le rayonnement solaire subit des modifications considérables [7], dues principalement aux phénomènes d'absorption et/ou de diffusion causés par les aérosols (poussière de diverses origines), ainsi que par les molécules d'eau et différents gaz (azote, oxygène, gaz carbonique...etc) présents dans la couche atmosphère enveloppante [8], [7].

II-2-3-3- Rayonnement solaire au niveau du sol

Après avoir traversé l'atmosphère, une partie du rayonnement incident parvient directement au sol, l'autre sera diffusé. Une autre composante du rayonnement est mise en évidence, c'est la partie renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffusée par le sol. Cette partie s'appelle l'ALBEDO, et qui varie en fonction du sol et de son état [7], [8].

- **Rayonnement global**

C'est l'énergie du soleil reçue par une surface horizontale, elle est la somme des deux rayonnements relatifs des rayonnements directs et diffus [4], [7].

- **Rayonnement direct**

C'est l'ensemble des rayonnements solaires parallèles qui produisent de l'énergie venant, directement du soleil vers la terre plus au moins alterné. (Par la diffusion ou l'absorption) [4], et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire [7].

- **Rayonnement diffus**

C'est le rayonnement solaire global à l'exception du rayonnement direct. Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère [7]. Il provient d'une manière isotrope de toutes les directions de l'espace, lui même, il est décomposé en : diffus (provenant du ciel, provenant du sol, provenant de la rétro- diffusion du sol) [4].

II-2-3-4- Spectre solaire

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou (couleurs). La lumière du soleil est en effet composée de tous sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisés par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde [6].

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E , qui répond elle même à la relation suivante :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

Où h est la constante de plank, ν la fréquence, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde [9].

C'est cette relation, mise à jour par Louis de broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière: présence de corpuscules –les photons –et propagation d'onde avec une fréquence de vibration et unlongueur d'onde. Une courbe standard de la réparation spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillites par les satellites, est désignée sous le nom de *AMO*. Sa distribution en énergie est répartie comme suit [6].

- Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ 6.4 %
- Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ 48.0 %
- Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45.6 %

La figure II-1, montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1.5, soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de 48° au niveau de la mer. La définition de ce spectre de ciel clair, noté *AM1.5*, sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. On peut également remarquer le spectre du diffus par beau temps, nettement renforcé vers le bleu du fait de la diffusion de Rayleigh sur l'air [5], [6].

On voit clairement sur le spectre *AM 1.5* les bandes d'absorption correspondant aux gaz de l'atmosphère, notamment le CO_2 et la vapeur d'eau. Est représenté aussi sur la figure II-1, le spectre d'un corps noir dont la température de couleur serait de 5900 K, très proche spectre solaire *AMO*. Le soleil est donc souvent assimilé à ce corps noir, ce qui permet aux physiciens d'élaborer des modèles pour expliquer son comportement et ses émissions de rayonnement [6].

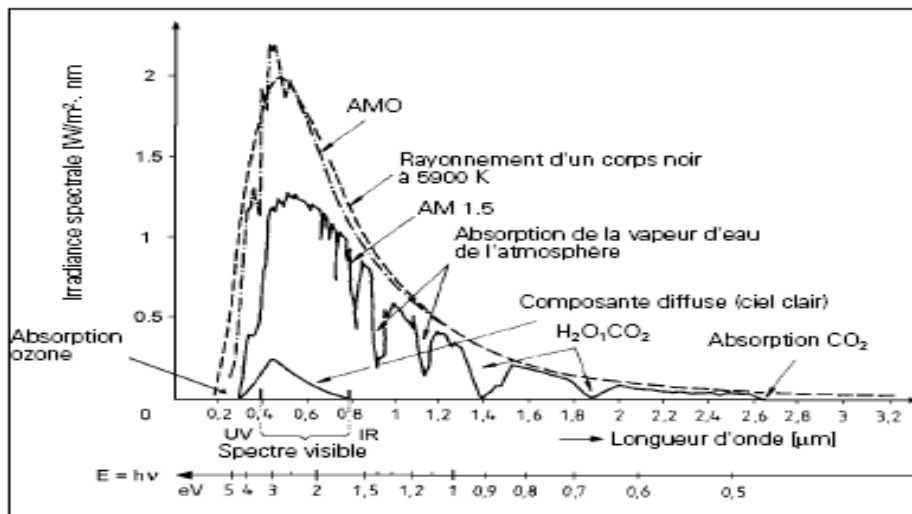


Figure II-1 spectre du rayonnement solaire: *AM0* (extraterrestre) et *AM1.5* (épaisseur de 1.5 atmosphère, correspondant à une hauteur du soleil de 48° au niveau de la mer) [1], [6]

II-2-3-5- Mesure du rayonnement solaire

Comme il est indispensable d'estimer et mesurer l'éclairement solaire dans les régions d'intérêt, un ensemble d'appareils de mesure sont mis au point et dont on cite les plus utilisés [8]:

- **Le pyranomètre**

Cet appareil est utilisé pour la mesure du rayonnement global et diffus. Dans le premier cas, on mesure le rayonnement incident sur une surface horizontale, et dont le spectre se situe approximativement entre $0.3 \mu m$ et $3 \mu m$ (lumière visible et proche – infrarouge); Parcontre dans le deuxième cas, la surface réceptrice se compose de deux anneaux concentriques en argent. L'anneau intérieur est recouvert de noir, celui de l'extérieur est recouvert de blanc. La différence de température entre ces anneaux, mesurée par des thermocouples est proportionnelle au flux lumineux incident. Ce type d'instrument possède une grande sensibilité telle que la tension de sortie pour l'éclairement maximal de l'ordre du millivolt [7], [8].

- **L'héliographe**

Cet instrument mesure la durée d'ensoleillement journalière. L'instrument actuel enregistre l'irradiation au dessus d'un seuil de $210 W/m^2$ (soit un -cinquième du maximum possible), et dont le plus répandue est celui de CAMPBELL –STOCKES. Il se compose d'une sphère en verre d'environ 10cm de diamètre permettant les rayons solaires sur une bande de carton bleu foncé, où le rayonnement laisse une trace de brûlure [8], [7].

- **Les pyréliomètres**

mesurent le rayonnement solaire direct (c'est-à-dire le rayonnement d'une petite partie du ciel contenant tout le soleil) en incidence normale.

- **Les pyrradiomètres**

mesurent le rayonnement total (de grande comme de courte longueur d'ondes) provenant d'un angle solide 2π [2].

II-3- Conversion photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont généralement a base de silicium, reliées entre elles, elles constituent des modules ou panneaux solaires, qui transforment directement la lumière du

rayonnement solaire en énergie électrique [2] environ 15% de l'énergie solaire reçue, comme l'indique la figure II-2.

Un panneau de 1m² permet de fournir une puissance de 100W et peut produire 80 à 150kWh/an. Les panneaux sont connectés à un récepteur et produisent de l'électricité selon le niveau d'ensoleillement. Leurs performances électriques sont garanties pendant 25 ans pour répondre à la demande en électricité, les panneaux peuvent être assemblés et interconnectés, constituant alors un "champs PV" 20 à 30m² de panneaux sont à même de satisfaire les besoins en électricité d'un foyer d'Europe du sud.

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour la production d'électricité, une énergie de haute qualité. Cependant, leur rendement est bien inférieur à celui des capteurs solaires thermiques.

Les sources d'énergie exercent la pression la plus forte sur l'environnement.

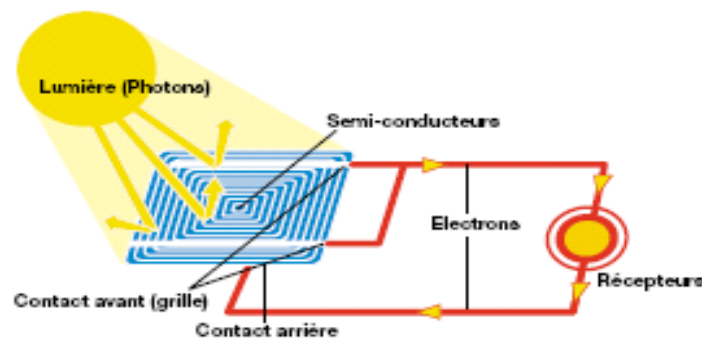


Figure II-2 la transformation directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique [28]

Les cellules photovoltaïques au silicium consistent en deux couches dopées, de caractéristiques électriques opposées. Dans la zone de charge d'espace (barrière n-p), les électrons "détachés" par la lumière et les "trous" sont poussés dans des directions opposées, générant ainsi une tension électrique continue de l'ordre de 0.6V des couches conductrices ou des bandes de contact sur les faces frontale et arrière permettent de recueillir le courant électrique et de l'utiliser. Les cellules solaires délivrent une tension continue. Elles ont les propriétés suivantes:

- La tension est pratiquement constante et, de plus, presque indépendante de l'irradiation solaire (intensité du rayonnement).
- La puissance électrique augmente proportionnellement avec la puissance du rayonnement.

Pour caractériser la puissance des cellules photovoltaïques, on indique leur puissance de crête en W_c (en anglais W_p : p =peak). Cette valeur indique la puissance délivrée par le champ des

cellules solaires lorsqu'elles sont exposées à un rayonnement incident de 1000W/m^2 pour une température de cellule de 25°C .

Selon des considérations théoriques, les cellules solaires devraient pouvoir atteindre en laboratoire un rendement d'environ 40%. Il en va, aujourd'hui encore, autrement dans la pratique [12].

On distingue: le silicium polycristallin le silicium monocristallin, plus efficace et plus onéreux. Le silicium amorphe, moins cher, destiné à des usages autonomes et de petites puissances [2].

II-3-1- Le module photovoltaïque

Le «module» photovoltaïque et par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension: entre 0.5 et 1.5V selon les technologies. Il faut donc toujours disposer de plusieurs photopiles en série pour obtenir une tension utilisable [1].

II-3-2- Caractéristique de la cellule

Pour déterminer la caractéristique de la cellule solaire, on part de la caractéristique d'une diode au silicium (jonction p-n dans l'obscurité), qui s'écrit :

$$I = I_s \left[\exp\left[\frac{u}{u_t}\right] - 1 \right] \quad (2)$$

Avec :

U : tension imposée à la diode

$U_t = kT/q = 26 \text{ mV}$ à 300 K°

K : coefficient de Boltzmann

$q = 1.602 \times 10^{-19}$ charge de l'électron

T : température absolue en K°

I_s : courant de saturation de la diode.

En illumination, cette relation devient :

$$I = I_p - I_s \left(\exp\left[\frac{u}{u_t}\right] - 1 \right) \quad (3)$$

Avec :

I_p : photocourant.

A l'aide de cette équation, on peut quantifier les paramètres suivants :

- Le courant de court-circuit I_{cc} , c'est la valeur du courant lorsque la tension $U=0$ [1]. Dans le cas idéal (R_s nulle, R_{sh} infinie) ce courant se confond avec le photo-courant I_p . Dans le cas contraire, en annulant la tension. Il vaut : $I_{cc}=I_p$ Pour le silicium $I_{cc}=30\text{mA/cm}^2$ pour un éclairage maximal [13]. Et la tension de circuit ouvert, U_{co} , lorsque le courant est nul [1], Dans le cas idéal sa valeur est légèrement inférieure à :

$$U_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_p}{I_s}\right) \quad (4)$$

Si $I_p \gg I_s$, la tension de circuit ouvert sera :

$$U_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_p}{I_s}\right) \quad (5)$$

Pour une photopile en silicium la tension de circuit ouvert U_{co} est de 0.55 à 0.6 V [13].

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log de I_p , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température $\frac{kT}{q}$. En effet, le courant de saturation, I_s , dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction: il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme $\frac{kT}{q}$. Donc la tension de circuit ouvert U_{co} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes.

On peut compléter le schéma équivalent de la cellule solaire en ajoutant deux résistances pour tenir compte des pertes internes. R_s représente la résistance série qui tient compte des pertes ohmiques du matériau, des métallisations et du contact métal /semi-conducteur, R_{sh} représente une résistance parallèle (ou résistance de fuite).

L'équation de la caractéristique courant- tension devient alors [1] :

$$I = I_p - I_s \left[\exp\left[\frac{q(U+I.R_s)}{KT}\right] - 1 \right] - \frac{U + I.R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

II-3-2-1- Schéma équivalent

Le schéma d'une cellule solaire est représenté sur la (Figure I-3). Sous un éclairage, la caractéristique d'une cellule peut être représentée par les relations suivantes [7].

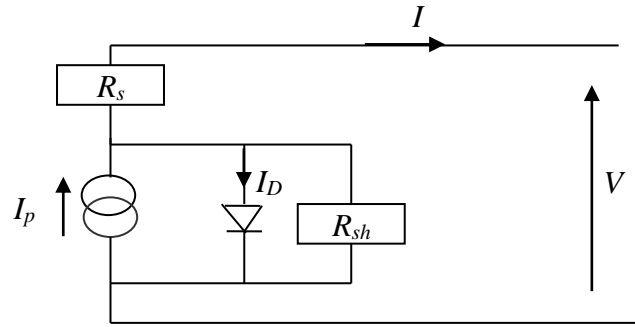


Figure II-3 schéma équivalent d'une cellule solaire

• **Modélisation du générateur photovoltaïque**

Le générateur photovoltaïque est une matrice formée de N_s module en série et N_p rangées en parallèle. La caractéristique $I-V$ peut être décrite par une équation non linéaire de la forme implicite :

$$I = I_{cc} - I_0 \left[\exp\left[\frac{(V + R_s \cdot I)}{V_{th}}\right] - 1 \right] - \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \tag{7}$$

Pour les modules où R_{sh} est supposée infinie, l'équation (7) se réduit à :

$$I = I_{cc} - I_0 \left[\exp\left[\frac{(V + R_s \cdot I)}{V_{th}}\right] - 1 \right] \tag{8}$$

L'identification de l'équation nécessite trois points de mesure dits :

- Le point de court-circuit ($I_{cc}, 0$).
- Le point de circuit ouvert ($0, V_{oc}$).
- Le point optimum (I_{op}, V_{op}).

La tension thermique V_{th} et le courant d'obscurité I_0 sont respectivement identifiés par [1] :

$$V_{th} = \frac{(V_{op} + R_s \cdot I_{op} - V_{oc})}{\log\left(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}}\right)} \quad \text{et} \quad I_0 = (I_{cc} - I_{op}) \exp\left[1 - \frac{V_{op} + R_s \cdot I_{op}}{V_{th}}\right] \tag{9}$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \tag{10}$$

$$\Delta T = \alpha \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \tag{11}$$

$$\Delta V = -\beta \cdot \Delta T - R_s \cdot \Delta I \tag{12}$$

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad (13)$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \quad (14)$$

II-3-2-2- Caractéristique courant-tension $I=f(V)$

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire, définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P- N avec un sens bloqué, mais décalée le long de l'axe des courants d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement [4], [1]. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante. Elle est construite point par point et par voie expérimentale [4].

La figure II-4, présente le fonctionnement du module. Il est caractérisé essentiellement par trois zones :

1. Zone a-b : le module fonctionne comme générateur de tension.
2. Zone b-d : zone préférée pour le fonctionnement optimal défini par le courant I_{op} et la tension V_{op} , où le module délivre sa puissance maximale (point c).

$$P_{op} = I_{op} \cdot V_{op} \quad (15)$$

3. Zone b-e : le module fonctionne comme générateur de courant [4].

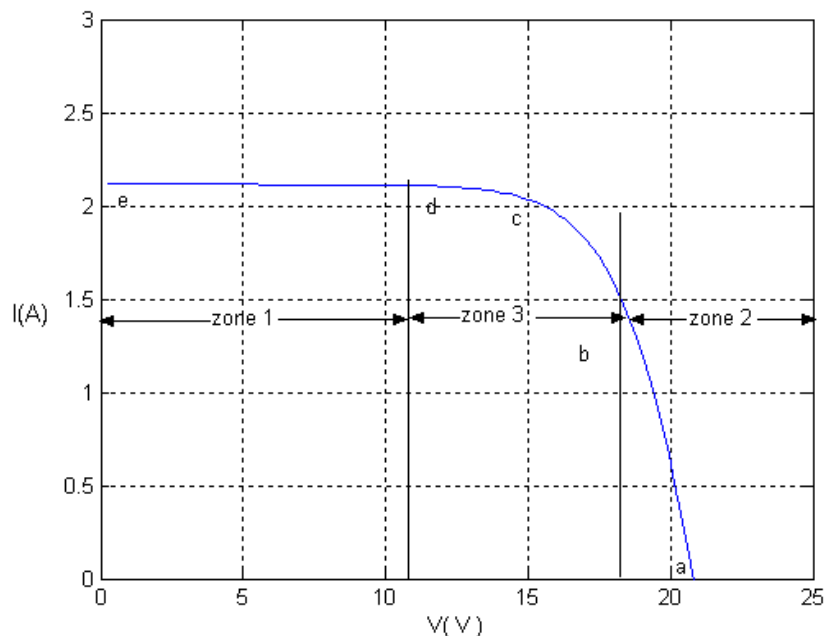


Figure II-4 caractéristique $I=f(V)$ du module solaire

II-3-2-3- Caractéristique puissance-tension $P=f(V)$

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement [14]. Puissance débitée par le module dépend de point fonctionnement. Le point M représente la puissance maximal par le module qui est donnée par [7]

$$P_{max}=I_{op}\cdot V_{op} \quad (16)$$

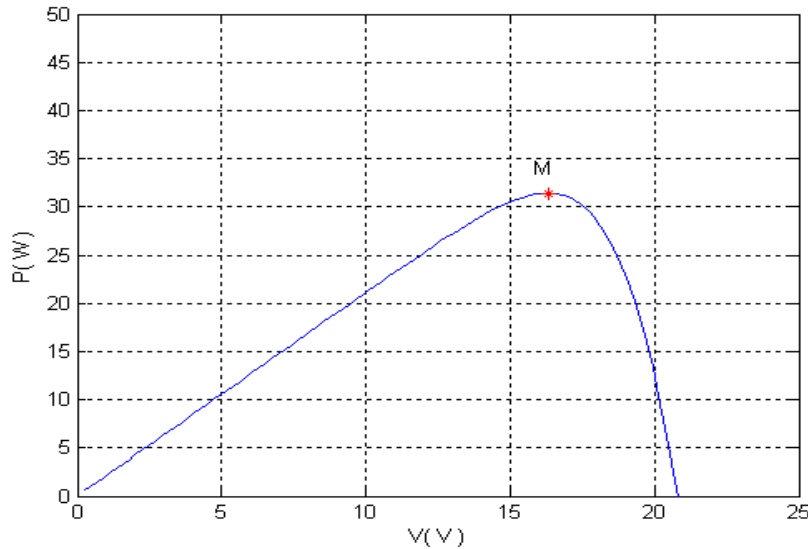


Figure II-5 caractéristique puissance – tension

II-3-2-4- Le rendement

Ce facteur définit le taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, il représente le rapport de la puissance fournie rapportée à celle du rayonnement d'incident [7]

$$\eta = \frac{P_{op}}{E \cdot A} \quad (17)$$

Où :

E : l'éclairement solaire (W/m^2).

A : la surface effective du module (m^2).

II-3-2-5- Facteur de forme

C'est un facteur de performance du module solaire. Plus ce facteur s'approche de l'unité, plus les cellules sont meilleures [1], [7]. Il compare la puissance maximale P_{op} délivrée au produit du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert [4], [1] :

$$FF = \frac{V_{op} \cdot I_{op}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \tag{18}$$

II-3-2-6- Influence de l'éclaiement

L'augmentation du flux lumineux se traduit en somme par le déplacement de la caractéristique suivant l'axe des courants. En effet l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'accroissement de la tension du circuit ouvert car le courant de court-circuit est une fonction logarithmique [1], [7], [4].

Ce faisceau de courbes se trace à température constante, et est illustré un tracé correspondant à une température $T_c = 25^\circ\text{C}$ comme l'indique les figures II-6 et II-7 [7].

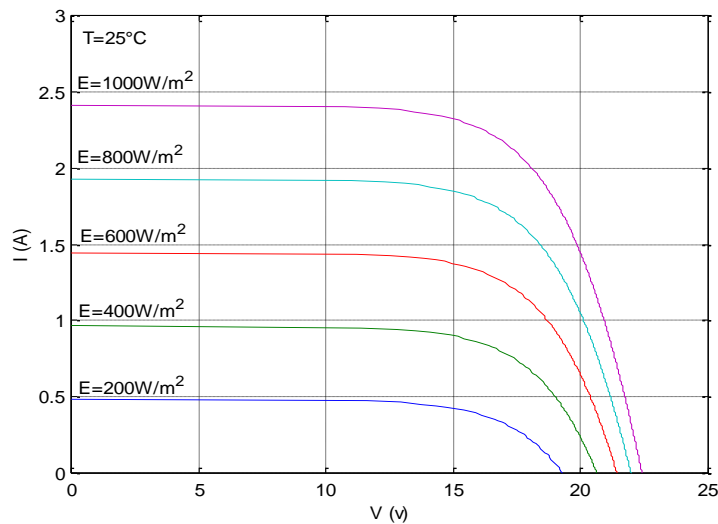


Figure II-6 effet de l'éclaiement sur la caractéristique $I(V)$ du générateur PV

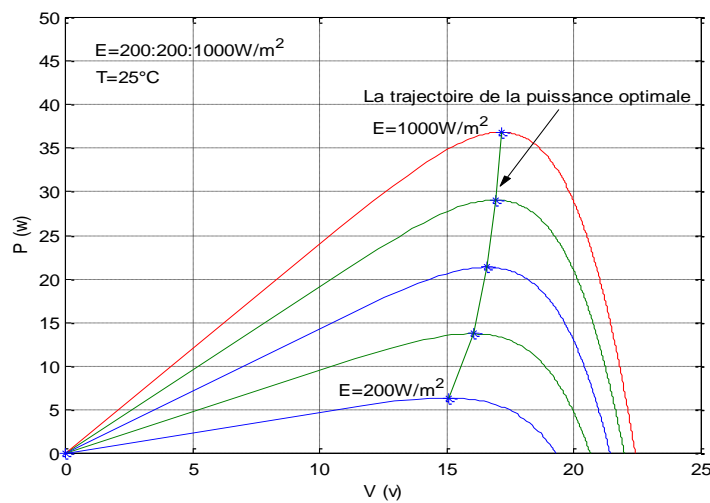


Figure II-7 effet de l'éclaiement sur la caractéristique $P(V)$ du générateur PV

II-3-2-7- Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente à peu près de $3 \cdot 10^{-2}$ mA/k par cm^2 de cellule. Par contre, le courant I augmente très rapidement avec T . Il engendre une diminution de la tension du circuit ouvert U_{co} . Cette diminution est de l'ordre de 2mV par degré. L'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible de l'ordre de $5 \cdot 10^{-5}$ W/K par cm^2 de cellule, soit une variation de 0.35% par degré [13].

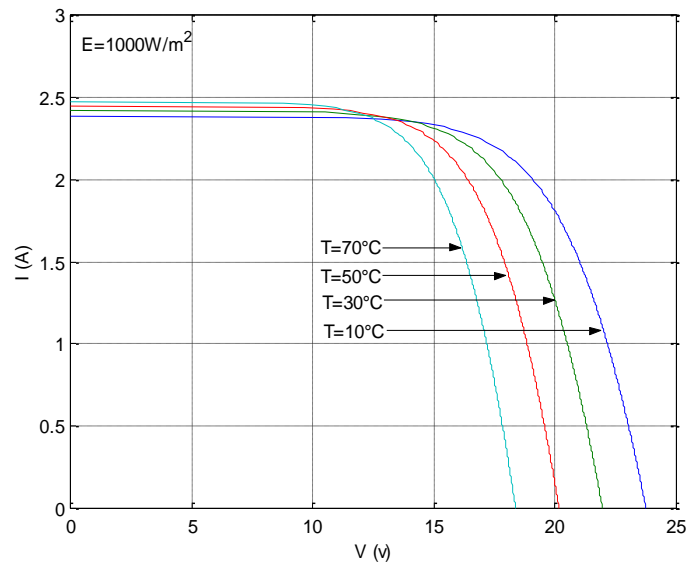


Figure II-8 effet de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ du générateur PV

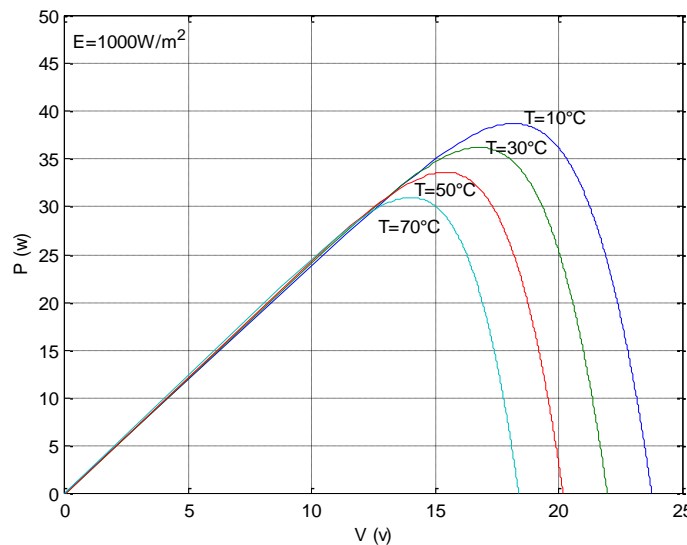


Figure II-9 effet de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ du générateur PV

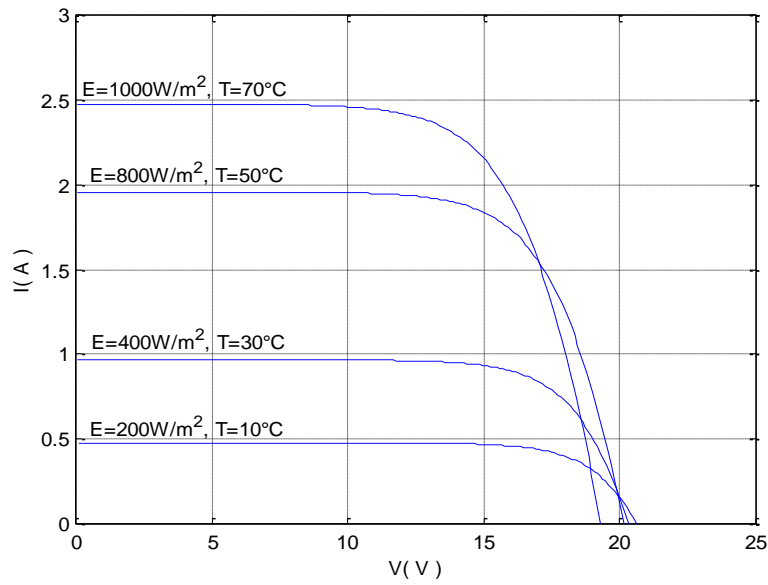


Figure II-10 effet simultané de la température et l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ du générateur PV

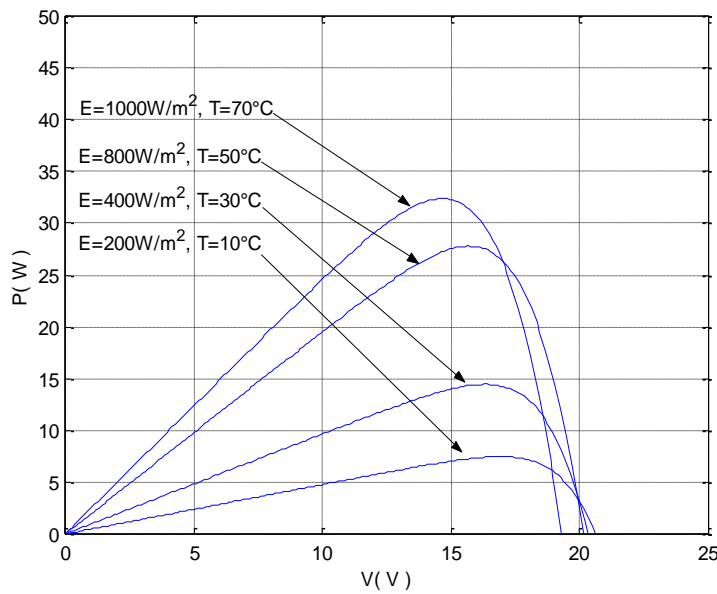


Figure II-11 effet simultané de la température et l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$ du générateur PV

II-3-2-8- La résistance série (R_s)

L'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule photovoltaïque se traduit par une diminution de la pente de la courbe $I = f(V)$ dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule [9].

II-3-2-9- La résistance shunt (R_{sh})

Elle caractérise le courant de fuite entre les contacts arrière et la grille, La puissance fournie par la cellule solaire dépend de la valeur de sa résistance parallèle car plus (R_{sh}) est élevée, la puissance fournie est importante [4].

II-3-2-10- Groupement des cellules

On peut monter les cellules ou les modules photovoltaïques identiques selon trois types de groupements : en série, en parallèle et en série - parallèle.

II-3-2-10-1- Groupement des cellules série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, la figure II-12, montre que le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [15].

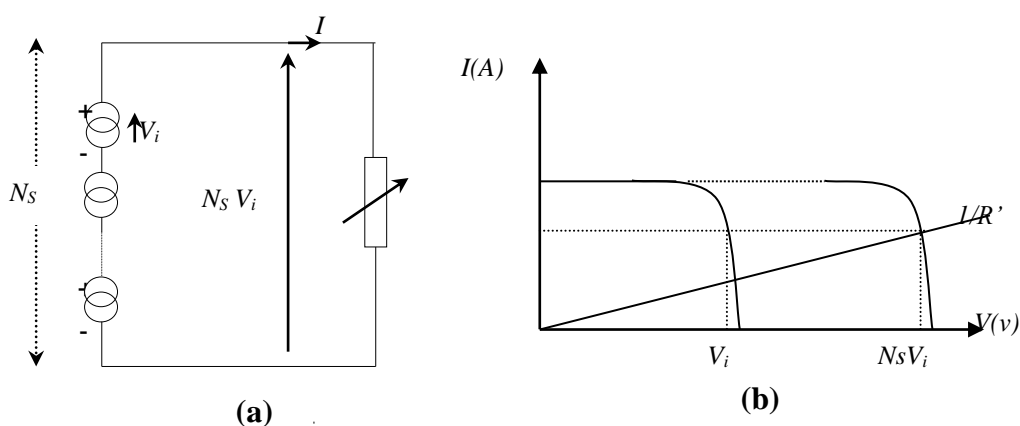


Figure II-12 schéma de connexion des cellules solaires en série [a] et $I=f(V)$

II-3-2-10-2- Groupement des cellules en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la figure I-13, montre que la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle [15].

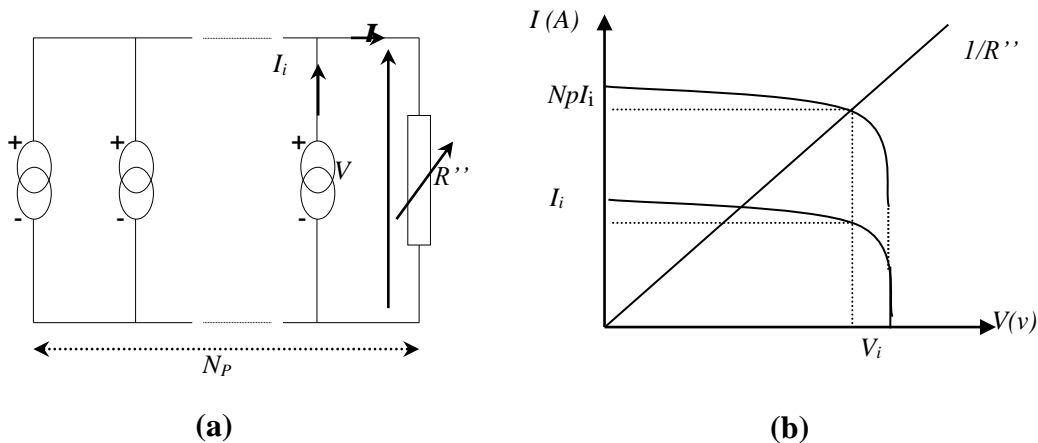


Figure II-13 schéma de connexion des cellules solaires en parallèles [a] et caractéristique $I=f(V)$

II-3-2-10-3- Groupement série -parallèles des modules

Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre (10 à 80W). Pour obtenir des puissances supérieures il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules, la courbe de fonctionnement d'une association série -parallèle de modules est une courbe semblable à la courbe de la cellule de base, avec bien entendu des paramètres électriques élevés. Notons ici que, de même pour les cellules, il ne faudra associer en série et en parallèle que des modules identiques [4].

II-4- Avantages du photovoltaïque

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- D'abord, une haute fiabilité : elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées; c'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux. Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milli Watt au MégaWatt.

- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [16], [17].

II-5- Inconvénients du photovoltaïque

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible à la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [17], [16].

II-6- Conclusion

Le courant solaire généré alors est donc forcément différent de I_{pmax} et la puissance solaire extraite du panneau photovoltaïque n'est pas égale à la puissance maximale. Ceci reste toujours vrai, même si l'ensoleillement est de 1000W/m^2 et la température des cellules de 25°C (conditions STC). Cette propriété intrinsèque de l'association batteries-panneaux solaires photovoltaïques fait qu'on parle de modules 12 V.

Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photocourant et du courant de diode à l'obscurité il y'a une baisse du courant solaire I_{cc} proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{co} et donc un décalage du point P_{max} du panneau solaire vers les puissances inférieures. Une élévation de la température (de jonction) des cellules solaires provoque un important accroissement de leur courant à l'obscurité et facilite une légère augmentation de la création de paires électron-trou. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photocourant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une légère augmentation du courant I_{cc} accompagnée d'une forte diminution de la tension V_{co} et donc un décalage du point P_{max} vers les puissances inférieures.

Chapitre III : énergie éolienne

III-1-introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité.

La présence de l'énergie éolienne est pleinement justifiée parmi ces nouvelles énergies. En effet avec les grandes éoliennes branchées sur le réseau, on produit des kilowattheures propres et renouvelables. Ainsi, utiliser le vent pour produire de l'électricité représente un atout formidable pour répondre à la fois aux besoins croissants d'énergie et à la lutte contre l'effet de serre.

III- 1-1-Historique

L'énergie éolienne est la plus ancienne énergie utilisée par l'homme en dehors de son énergie musculaire. L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle.

On peut ainsi trouver la trace d'ancêtres des éoliennes modernes jusque dans la Perse ancienne. Plus près de nous, certains pays ont, depuis le Moyen Âge, largement fait usage de ce type d'énergie par le biais des moulins à vent (**moulins hollandais**) ou des **éoliennes dites américaines** que ce soit pour moudre le grain ou pomper l'eau. Au cours des siècles, on a vu ainsi la technologie des moulins évoluer grâce à l'apparition de toits orientables permettant une utilisation plus intensive, puis de moulins complets montés sur pivot. Enfin, la dernière évolution marquante a été l'adoption de profils semblables à des ailes d'avion, en lieu et place de la toile tendue sur une structure en bois, du fait de la compréhension des phénomènes aérodynamiques, acoustiques et aéroélastiques impliqués.

Parallèlement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement.

III -2-Utilisations des éoliennes et différentes architectures de construction

III -2-1-Applications des éoliennes

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent.

Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau,
- soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :

- l'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure,
- l'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne, à savoir d'une part la complémentarité avec les moyens traditionnels de production (centrales thermiques classiques ou nucléaires, barrages...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante et d'autre part la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement.

III -2-2-Machines à axe vertical

Si les capteurs à axe vertical (axe de transmission perpendiculaire au sol) ont été probablement les premiers utilisés, par la suite ils ont été abandonnés au profit des précédents. C'est assez récemment qu'ils ont été redécouverts et ont fait l'objet de nouveaux développements qui en font des concurrents directs des capteurs à axe horizontal en présentant sur eux un certain nombre d'avantages.

Deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines, à savoir la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.



Figure III-1 Eolienne à axe verticale

III- 2-2-1-La traînée différentielle

Le principe de mise en mouvement de ce type de machine le suivant: les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (figure III- 2). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.

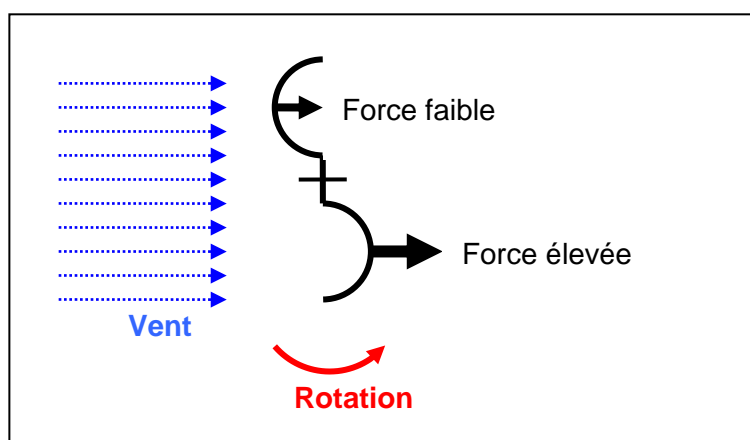


Figure III- 2 Effet du vent sur un corps creux

L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est **le rotor de Savonius** (figure III- 3), du nom de son inventeur, un ingénieur finlandais qui l'a breveté à la fin des années 1920. Le fonctionnement est ici amélioré par la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi cylindres, ce qui augmente le couple moteur.

On peut aisément imaginer que, lors du démarrage de ce type de machine (phase d'établissement du vent), les cylindres soient orientés par rapport au vent de telle manière que le couple résultant soit nul. L'éolienne ne pourra donc pas démarrer spontanément. La superposition de plusieurs rotors identiques, mais décalés d'un certain angle l'un par rapport à l'autre, permet de remédier à ce problème, rendant ainsi la machine totalement autonome.

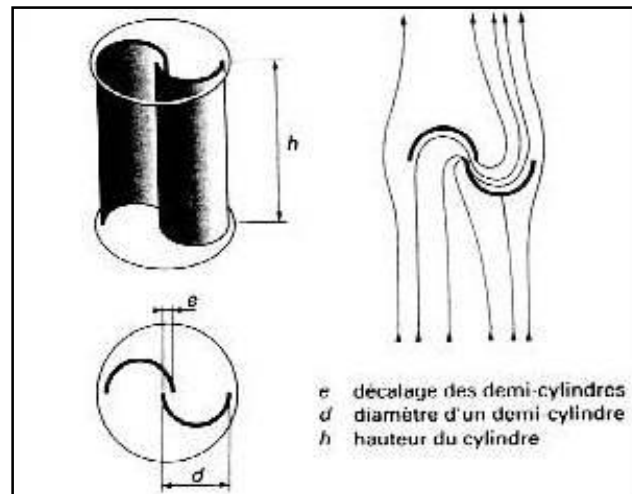


Figure III- 3 Rotor de Savonius

Le rotor de Savonius, étant très simple, présente un intérêt pour les pays très peu industrialisés car il est facile à fabriquer. Il a été développé aussi pour de petites éoliennes conçues pour la navigation de plaisance (recharge de batteries). De plus, il démarre à de faibles vitesses de vent, de l'ordre de 2 m/s. Les dimensions des machines à rotor de Savonius restent toutefois modestes, 3 à 4 m de hauteur maximale pour des diamètres de 2 m environ.

III- 2-2-2-Variation cyclique d'incidence

Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français **Darrieus**. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique... (figure III- 4).

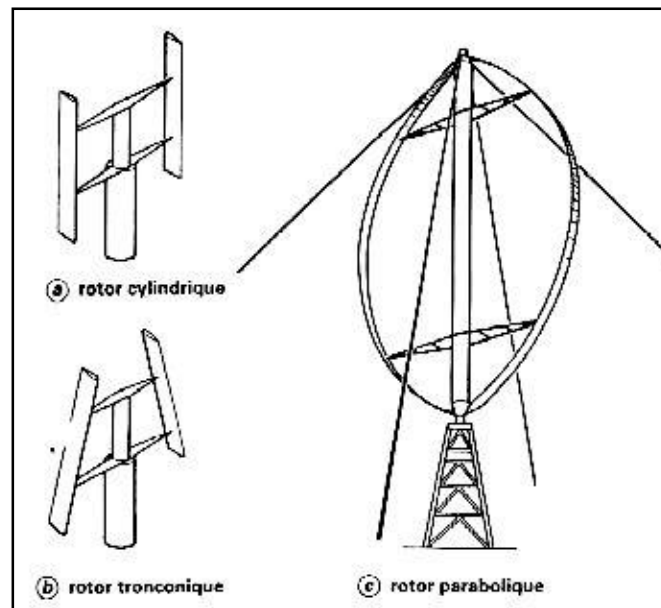


Figure III-4 Différents types de rotor de Darrieus

III- 2-2-3-Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable, ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Par ailleurs, le principe même de fonctionnement, basé sur des variations incessantes de charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité. Enfin, pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très conséquente

III-2-3-Machines à axe horizontal

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion. La portance de ces ailes placées dans le vent ne sert pas ici à sustenter un aéronef mais à générer un couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique tel qu'une génératrice électrique, une pompe... Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Leur axe de transmission est parallèle au sol.

Une catégorie particulière d'éolienne à axe horizontal est celle des machines multipales de faible diamètre (jusqu'à 10 m environ). La masse importante de la roue aubagée, les vitesses de rotation peu élevées (en regard du diamètre) font que ces machines de faible puissance sont utilisées principalement pour le pompage de l'eau.

Cependant, une application récente de ce type de machine (avec des diamètres de l'ordre du mètre) est la génération électrique à bord de bateaux de plaisance ou de course au large.

Etant donné la prédominance des éoliennes à axe horizontal dans le monde, seul cette dernière architecture sera étudiée en détail dans la suite du rapport.



Figure III-5 Eolienne à axe verticale

III-3-Les composantes d'Une éolienne

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, comme illustré sur la figure III- 6.

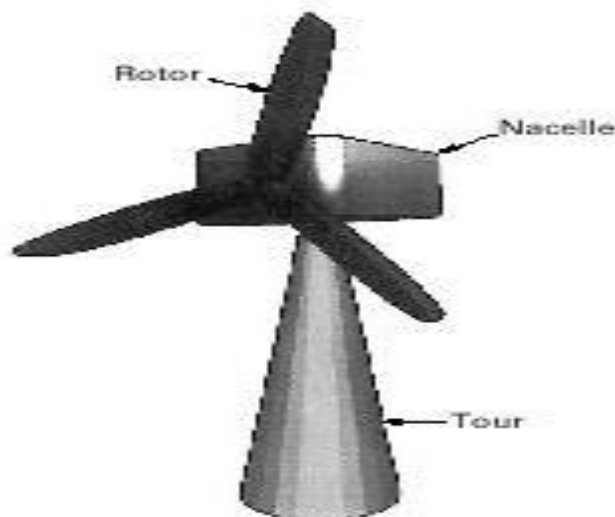


Figure III-6 Composantes d'une éolienne

III-3-1-Le rotor et ses pales

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variable, freinage du rotor.)

- **Le rotor**

L'utilisation de rotor à trois pales est prédominante dans l'ensemble des machines de moyenne et grande puissance (> 30 kW), exploitées ou construites dans le monde soit environ 80 % du marché.

En terme de poids, une éolienne monopale doit être munie d'une masse inerte permettant l'équilibrage de la pale : elle est donc sensiblement équivalente à une machine bipale.

Dynamiquement, la configuration tripale est la plus équilibrée. Elle doit cependant accepter un chargement cyclique plus important. Aérodynamiquement, les études montrent un léger avantage à posséder plusieurs pales (réduction des pertes d'extrémités). On augmente ainsi le coefficient de puissance d'environ 10 % en passant d'une pale à deux, de 3 % en passant de deux à trois, de 1 % en passant de trois à quatre, etc.

Le choix résulte donc d'un compromis entre l'efficacité aérodynamique du rotor, le poids, la dynamique des structures et le prix associé.

- **Les pales**

La pale d'une éolienne est en réalité le véritable capteur de l'énergie présente dans le vent. De ses performances dépend la production d'énergie de l'installation, puis par conséquent l'intérêt économique de la machine.

La conception d'une pale doit faire appel à un compromis délicat entre le rendement aérodynamique, la légèreté, la résistance statique, la tenue en fatigue.

Ainsi le choix des profils, leur répartition en envergure, la forme en plan (évolution de la corde en fonction de l'envergure) et le vrillage de la pale doivent être soigneusement étudiés.

Par exemple, selon le type de régulation choisi et selon la taille de l'éolienne, le vrillage pourra différer significativement d'une machine à l'autre.

Pour une machine de grande taille à pas variable, on pourra envisager de démarrer la rotation en s'aidant du générateur utilisé en moteur. Par contre, pour une petite éolienne régulée au décrochage, le vrillage, notamment au pied de la pale, devra permettre un démarrage autonome de la machine. À ces contraintes s'ajoutent bien évidemment les critères relatifs au vent que la machine devra « utiliser ». Les constructeurs sont ainsi amenés à proposer différents types de pales pour une même puissance en fonction de la vitesse moyenne rencontrée sur les sites d'implantation.

Après le choix d'une première configuration aérodynamique, il faut concevoir une structure résistante et légère. Là encore, les conditions de vent (vitesses, taux de turbulence) influent sur la conception (charges extrêmes, tenue en fatigue).

On s'aperçoit donc aisément que la conception d'une pale est en fait un procédé itératif avec de nombreux paramètres et de nombreuses contraintes. Il est indéniable que l'apparition de logiciels de calcul évolués associés à des optimiseurs facilite grandement la tâche du concepteur

III-3-2-La nacelle

La nacelle est une véritable salle des machines perchée dans le ciel. Elle comporte une ou deux génératrices, une boîte de vitesses, un système de freins à disque et différents équipements automatisés d'asservissement. On construit maintenant des éoliennes énormes de 1 500 kW sur des tours de près de 50 mètres et qui sont surtout limitées non par la technologie, mais par les grues gigantesques qu'elles nécessitent.

La figure III- 7 présente une coupe de la nacelle avec ses différentes composants :

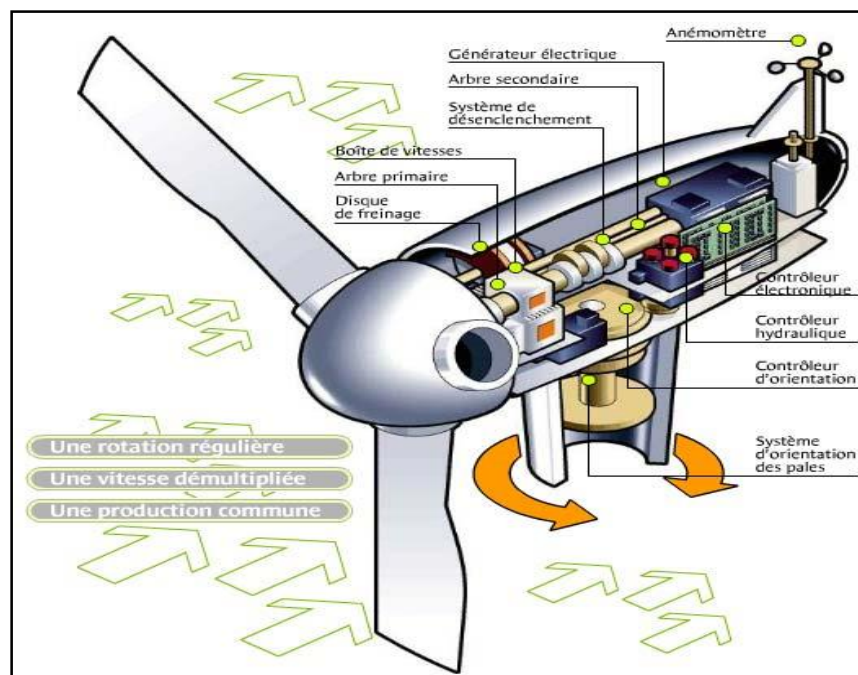


Figure III-7 Eléments de la nacelle

- **Le multiplicateur de vitesse**

Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques. La boîte de vitesse permet d'avoir un rotor tournant lentement (30 à 40 tours/min) pouvant se coupler à un générateur de série, donc peu cher, qui tourne lui 40 à 50 fois plus vite. Dans les pays froids on doit réchauffer ces grosses boîtes d'engrenages.

- **L'arbre secondaire**

L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

- **La génératrice**

C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

C'est un alternateur. Les plus simples et robustes sont des générateurs à induction, mais il faut alors contrôler leur excitation par des condensateurs ou les relier au réseau, ce qui n'est pas facile. On doit essayer de stabiliser la vitesse de ces moteurs asynchrones près de leur puissance nominale (vers 1 800 tours) pour avoir en bout de ligne une fréquence et une

tension régulières. Voilà pourquoi certains fabricants installent 2 génératrices, l'une exploitant les basses vitesses de vent, l'autre pour les hautes vitesses.

On peut utiliser une génératrice autoexcitée : un moteur synchrone à aimants permanents. Plus facile à gérer, ce type d'alternateur est plus cher et comporte de nombreuses pièces mécaniques.

Enfin, l'avenir pourrait bien se situer dans les génératrices à basse vitesse car elles suppriment tout recours à un multiplicateur. La nouvelle génératrice discoïde de Jeumont Industrie est une innovation majeure car elle réduit la taille, normalement imposante, de ces alternateurs multipôles. Toutefois, le courant produit doit passer par un onduleur de grande puissance. Il s'agit là aussi d'une technologie de pointe.

Ces équipements peuvent nécessiter un système de refroidissement liquide, ce qui leur permet d'avoir une taille plus réduite.

- **Un contrôleur électronique**

Il est chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor + nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instantanés sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

- **Le dispositif d'orientation de la nacelle**

Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée : cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance. Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours, de manière à éviter de tordre inconsidérément le câble acheminant l'énergie électrique provenant de la génératrice jusqu'au pied de la tour. Au bout d'un certain nombre de tours de la nacelle, celle-

ci est alors manoeuvrée en sens inverse à l'aide des moteurs d'orientation pour dévriller le câble.

On trouve aussi divers dispositifs de refroidissement par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile et un groupe hydraulique.

III-3-3-La tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor + nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie.

Trois grands types de tour peuvent se rencontrer :

✓ **mât haubané :**

Il est simple de construction mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât. Il présente toutefois l'avantage de pouvoir soustraire l'éolienne à des conditions météorologiques extrêmes (forte tempête, cyclone). L'emprise au sol du haubanage peut devenir un obstacle à son utilisation.

✓ **tour en treillis :**

Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain.

✓ **tour tubulaire :**

Bien que de construction plus complexe, elle a la faveur des constructeurs car elle permet d'abriter certains dispositifs de régulation ou de commande et apporte une protection évidente aux personnels chargés de la maintenance qui doivent grimper jusqu'à la nacelle (installation aisée d'une échelle voire d'un ascenseur intérieur). Son aspect esthétique est de plus un atout pour l'intégration visuelle harmonieuse de l'éolienne.

Pour les petites éoliennes, la solution la moins coûteuse est un tuyau en sections qui se trouve amplement haubané. La dimension du tuyau d'acier est surtout fonction du poids de

l'éolienne, car ce sont les haubans qui assurent la stabilité de l'ensemble. Plus il y a de haubans et de structure porteuse, plus le bruit est élevé dans les grands vents.

Les tours en treillis sont les moins chères, mais souvent mal acceptées.

La dernière alternative, la tour tubulaire est beaucoup plus élégant, (aucun hauban n'est alors nécessaire) mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané. La solidité de la fondation deviendra un élément important. C'est la solution pour les grandes éoliennes.

Remarque : la fondation

Avec ses 400 tonnes de ciment et de fer d'armature, c'est un élément important d'une grande éolienne. La forme est ronde ou carrée mais peut aussi être en étoile pour réduire l'usage du ciment.

III-4- le vent

III- 4-1- Causes

Le vent est un *sous-produit* de l'énergie primaire provenant du soleil. La terre et son atmosphère constituent une vaste machine thermique dont la source chaude, constamment variable, est l'hémisphère irradié par le soleil, et la source froide, également variable, l'hémisphère obscur. Le fluide de travail, l'air, passe chaque jour de l'un à l'autre. Ce cycle produit une énergie mécanique qui est l'énergie cinétique de l'air ou *vent*. Par suite du faible écart de température, de l'ordre d'une dizaine de degrés, le rendement est peu élevé. Néanmoins, étant donné la quantité de chaleur, l'énergie éolienne, pour l'ensemble du globe, est considérable. Elle se situe entre $2,5 \times 10^{15}$ et 5×10^{15} kWh/an. Toutefois, une petite partie seulement est vraiment récupérable.

III-4-2- Caractéristiques

La puissance du vent est sensiblement constante à chaque instant pour l'ensemble du globe, en un lieu donné et sur une période solaire, mais elle varie considérablement en tout lieu et suivant les jours. La vitesse du vent est très variable. Le tableau suivant donne, en fonction de sa vitesse, les différents effets que l'on peut constater :

Échelle en degrés Beaufort	Nature du vent	Effets physiques	Vitesse du vent (moyenne) (m/s)
1	vent insensible et très faible	la fumée monte verticalement (les feuilles semblent immobiles)	1
2	brise infime	imperceptible frémissement des feuilles	2
	brise légère (les moulins démarrent)	la fumée est légèrement déviée les feuilles s'agitent doucement	3
3	vent modéré (frais)	la fumée est nettement déviée	4
4	vent léger	les petits rameaux remuent un peu	6
	brise moyenne (bon frais)	les branchettes plient légèrement	7
5	forte brise	les branchettes plient nettement	8
	grand frais	les branches oscillent et se balancent	9
6	très forte brise	les branches plient	10
	vent fort	les peupliers plient	12
7	vent très fort	les feuilles sont arrachées	15
8	vent impétueux	les petites branches cassent	20
9	fort coup de vent	les branches moyennes se brisent	22
10	tempête violente	début de dégâts sur les toitures	24
11	tempête violente	les fortes branches cassent	30
	ouragan	ravages étendus	36
12	grand ouragan	les toitures sont très endommagées gros arbres et toitures sont arrachés effets catastrophiques	46

Tableau III-1 la différent effet de vent en fonction de vitesse

III-4-2-1-Irrégularité spatiale

Le vent est, en moyenne, faible dans la zone polaire nord et dans la zone intertropicale ; il est maximal vers $\pm 55^\circ$ de latitude. Il est fort en mer. En Eurasie, il décroît d'ouest en est. À ces évolutions à grande échelle, se superposent de nombreuses irrégularités à échelle beaucoup plus petite, parfois de quelques dizaines de kilomètres carrés.

La vitesse du vent est une fonction croissante avec la hauteur au-dessus du sol et avec l'altitude (par rapport au niveau de la mer).

La loi de répartition de la vitesse suivant une verticale dépend, d'une part, du relief local et, d'autre part, de la *rugosité* de la région. Au sommet d'une colline arrondie, on a un accroissement local de vitesse dont l'effet peut inverser le gradient de vitesse habituel et faire que la vitesse au sol soit plus grande qu'à une certaine hauteur.

La figure III- 8 traduit la répartition de la vitesse du vent en fonction du relief rencontré et de l'altitude.

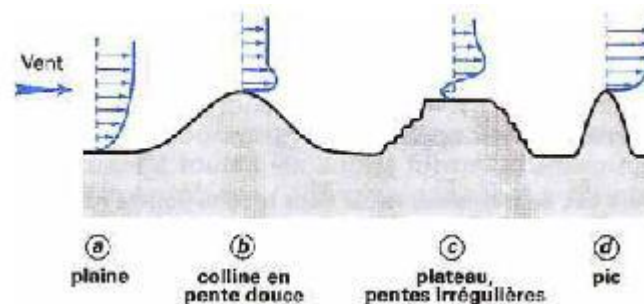


Figure III- 8 Répartition de vitesse du vent En fonction du relief rencontré et de l'altitude

En terrain plat, on peut représenter la variation de vitesse v en fonction de la hauteur h au-dessus du sol par la loi :

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

avec v_0 vitesse à la hauteur h_0 de référence au-dessus du sol,

α coefficient caractéristique du lieu.

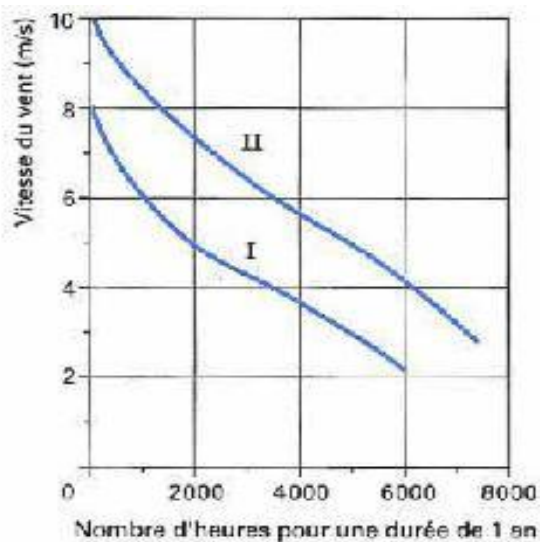
Le coefficient α a sensiblement les valeurs suivantes :

- en mer : $\alpha = 0,13$;
- sur un rivage : $\alpha = 0,16$;
- en plaine : $\alpha = 0,2$;
- en plaine boisée : $\alpha = 0,24$;
- en ville : $\alpha = 0,3$.

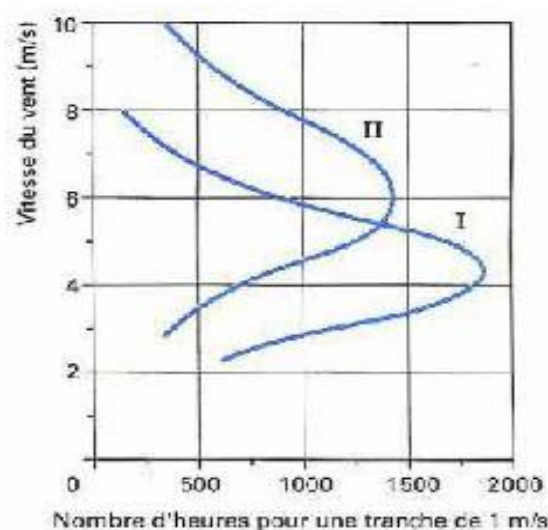
III-4-2-2-Irrégularité temporelle

Le vent varie considérablement dans le temps. À partir de relevés anémométriques, on trace la **courbe vitesse-durée** intéressant une période donnée (en général un an) : pour chaque valeur de la vitesse du vent, on détermine le nombre d'heures pendant lesquelles cette vitesse du vent est supérieure ou égale à la vitesse considérée (figure III- **9-a**). On peut caractériser ces courbes par la valeur moyenne annuelle pour la période considérée. Il est possible aussi d'en déduire la **courbe de fréquence** (c'est-à-dire la variation inverse de la pente des courbes vitesse-durée) qui indique le nombre d'heures, pour la période considérée, pendant lesquelles la vitesse du vent reste comprise entre des valeurs données (figure III **-9-b**). Cette courbe de fréquence donne une idée de la régularité du vent en un lieu donné.

Les irrégularités sont maximales à l'échelle du mois. En moyenne, le vent est le plus fort en janvier, le plus faible en juillet. La répartition saisonnière est approximativement sinusoïdale. Les variations de courte durée ont des causes locales.



a – Courbe vitesse-dur



b – Courbe de fréquence

I vitesse moyenne annuelle : 3 m/s

II vitesse moyenne annuelle : 5 m/s

Figure III -9 Courbe vitesse-durée et Courbe de fréquence

III-4-2-3-Energie du vent récupérable

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air qui traverse une certaine surface S . La puissance \dot{W} est donc :

$$\dot{W} = \frac{1}{2} \rho v^2 S v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (2)$$

Avec ρ masse volumique de l'air

($\rho \approx 1,25 \text{ kg/m}^3$ dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer).

La puissance \dot{W} varie donc comme le cube de la vitesse v du vent.

La masse volumique étant faible, la puissance éolienne est une puissance diluée puisque la vitesse v ne vaut, le plus souvent, que quelques mètres par seconde.

On parle plutôt d'énergie annuelle. Dans des régions à vent très faible, l'énergie théorique ne peut être que de 200 kWh/m² et par an. Dans certaines régions privilégiées, en Bretagne, Normandie et Roussillon, elle atteint 4 000 kWh/m² et par an à 40 m au-dessus du sol. En moyenne en France, elle est de 800 kWh/m² et par an.

III-5-principes de fonctionnement

III-5-1 - Aérodynamique de l'éolienne

Le rotor d'une éolienne fonctionne suivant le même principe que toute autre hélice. Les développements qui vont suivre s'attacheront à préciser les aspects, notations ou notions propres à l'univers de l'éolien.

III- 5-1-1 Fonctionnement aéromoteur

Les modes de fonctionnement d'une hélice peuvent être représentés de la façon suivante (figure III-10) :

Un élément de pale, situé à un rayon r , est soumis à un flux local de vitesse relative \vec{W} . Celui-ci engendre un moment M et une force résultante \vec{P} . Cette force peut se décomposer en une force de traction \vec{T} , suivant l'axe de l'hélice, et une force dans le plan rotor \vec{F} , responsable d'un couple $C = Fr$.

Le domaine A correspond à celui d'une hélice tractrice où l'énergie est fournie au fluide par l'élément de pale (avion). Lorsque la résultante \vec{P} se situe dans le domaine C, c'est le fluide qui fournit de l'énergie à la pale : on se trouve alors dans le cas d'un fonctionnement aéromoteur caractéristique des éoliennes

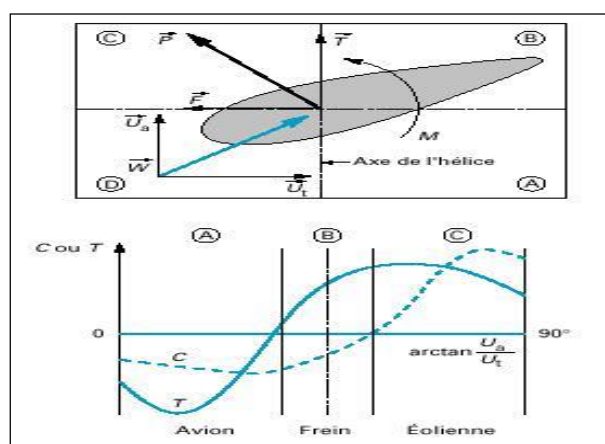


Figure III- 10 Comportement d'une pale dans un flux

III-5-1-2-Formule de Betz

Lorsque l'hélice est aéromotrice, le flux est ralenti au passage du disque rotor (figure 11) :

$$V_0 > V_1 > V_2$$

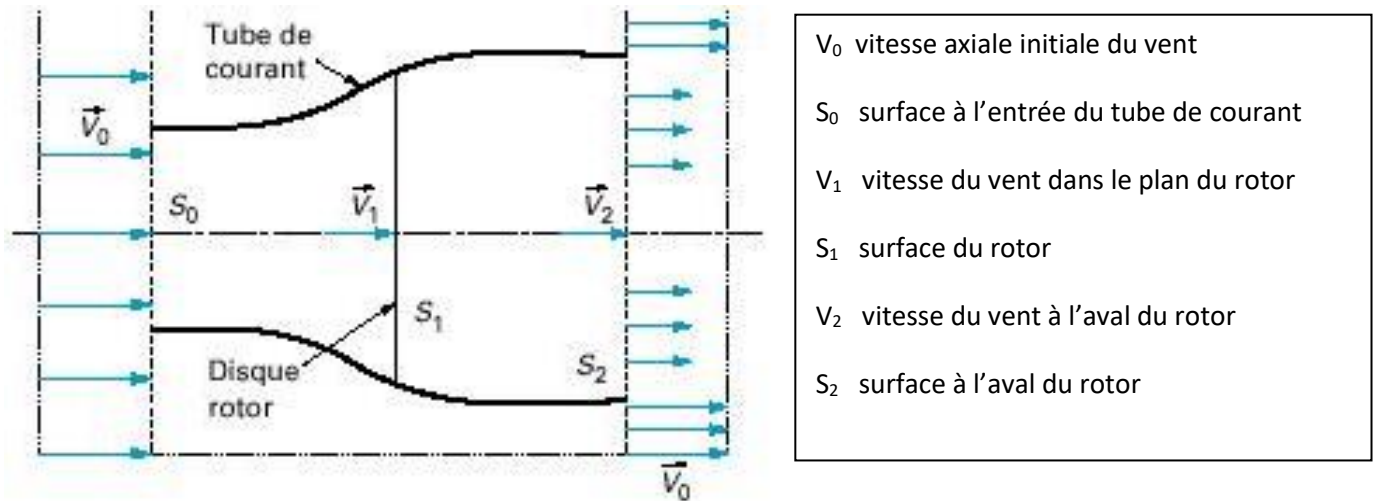


Figure III-11 Représentation du tube de courant

En appliquant la théorie de Froude (et les hypothèses associées), on obtient :

- Pour la puissance absorbée par le rotor :

$$P = \rho S_1 V_1^2 (V_0 - V_2) \quad (3)$$

avec ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) masse volumique de l'air.

- Pour la variation de l'énergie cinétique par seconde de la masse d'air :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho S_1 V_1 (V_0^2 - V_2^2) \quad (4)$$

$P = \Delta E_c$ donne :

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} \text{ et l'expression de } P \text{ correspondante.}$$

L'étude de la variation de la puissance en fonction de la vitesse à l'aval, $\frac{dP}{dV_2}$, fournit

une seule racine ayant un sens physique : $V_2 = \frac{V_0}{3}$, correspondant au maximum de puissance.

En définissant le coefficient de puissance $C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S_1 V_0^3}$, on aboutit à la limite de Betz,

première personne ayant développé la théorie globale du moteur éolien à axe horizontal :

$$C_{P_{MAX}} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (5)$$

qui caractérise la limite maximale de l'énergie, due à la masse d'air amont, susceptible d'être captée par une éolienne.

Ce coefficient de puissance permet de classer les différents types d'éoliennes suivant leur nature (figure III-12).

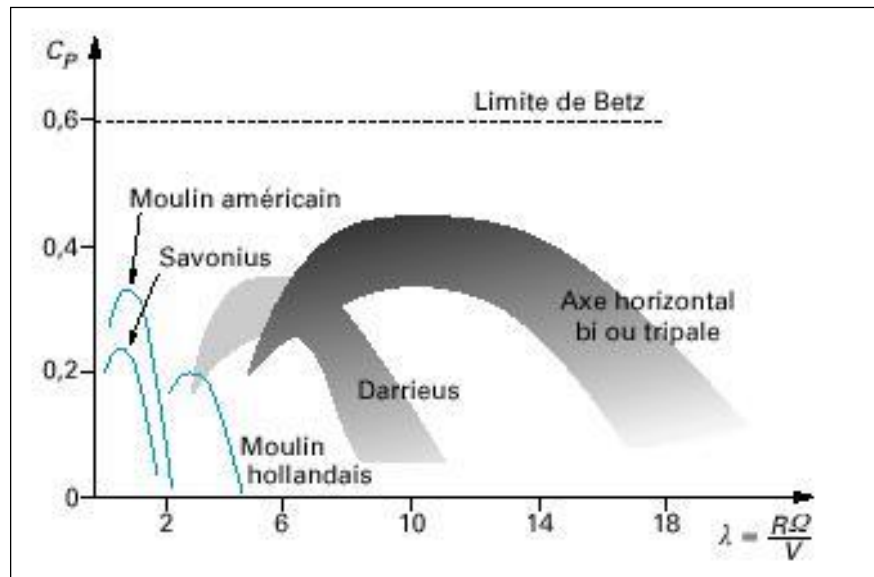


Figure III -12 Classement des types d'éolienne

III-5-1-3-Modélisation du sillage

La manière la plus simple de modéliser une hélice est de la considérer comme un disque rotor : cela permet de réaliser des approches rapides mais, bien sûr, inexactes. De nombreux modèles analytiques, numériques, avec des corrections empiriques ou semi empiriques ont été développés, que ce soit pour les hélices, les rotors d'hélicoptère ou les éoliennes.

La méthode la plus répandue se base sur la **théorie tourbillonnaire** développée par **Glauert** à laquelle s'ajoutent des corrections telles que celles de **Prandtl**. Un tourbillon (figure III-13) résulte de la compensation naturelle provoquée par la discontinuité de vitesse

entre l'intrados et l'extrados d'un profil. On peut alors calculer des circulations puis des vitesses induites qui modifient les caractéristiques locales du vent vu par le profil

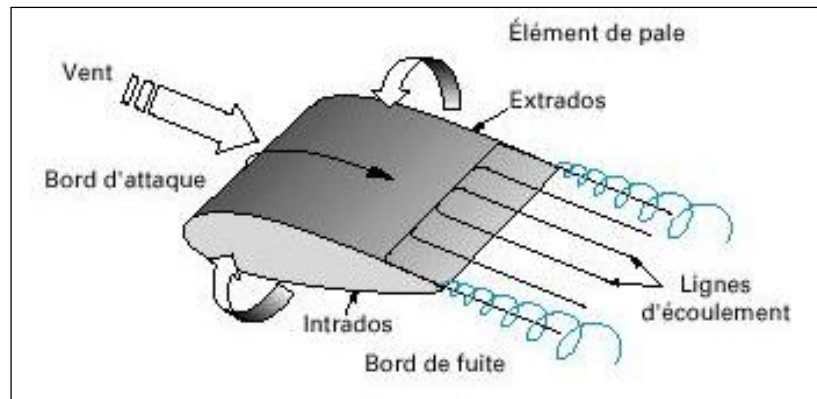


Figure III-13 Création de tourbillon

III-6-conclusion

La production d'énergie électrique à l'aide d'éoliennes fait appel à des compétences poussées dans des domaines multiples et variés : aérodynamique, mécanique, résistance des matériaux, génie électrique et électronique, BTP, réglementation, auxquels s'ajoutent bien évidemment les aspects environnementaux.

Si l'implantation d'une machine isolée de faible puissance est relativement aisée, en revanche la réalisation d'une ferme éolienne de grande puissance, sur terre ou mieux encore en offshore, est un véritable défi technologique et humain. Toutefois, le développement d'outils informatiques, aptes à traiter chacune des étapes nécessaires à l'aboutissement d'un projet de grande envergure et à permettre d'exploiter au mieux les possibilités d'un gisement de vent, permet d'envisager sereinement une part de plus en plus conséquente de ce type d'énergie dans la production mondiale d'électricité

Chapitre IV: énergie hydraulique

IV-1- Introduction

Jusqu'à la Révolution Industrielle, le bois et la force animale fournissaient l'essentiel de l'énergie utilisée par l'homme. Mais, utilisée depuis longtemps pour entraîner des machines, l'énergie hydraulique fournissait la plus grande partie de l'énergie mécanique. Aujourd'hui, l'énergie hydraulique représente 6 à 7 % de l'énergie consommée mondialement, mais près de 20 % de l'électricité.

L'énergie hydraulique est une énergie peu concentrée : pour produire 1 kWh électrique dans une usine ayant un rendement de 85 %, il faut faire chuter 10 tonnes d'eau d'une hauteur de 40 m. Il en résulte que, pour produire des quantités importantes d'électricité, il faut soit disposer de gros débits (se comptant en milliers de m³ par seconde), soit disposer d'une grande hauteur de chute (se comptant en centaines de mètres, soit les deux). Il faut en outre que l'eau soit disponible en quantités suffisantes, ce qui dépend du bassin versant et de la pluviométrie.

Lorsque ces conditions sont réunies, on parle de grande hydraulique : en France, le Rhin et le Rhône sont équipés "au fil de l'eau" (la majeure partie du débit est turbinée dans des chutes d'environ 10 m de hauteur, sans retenue), alors que sur les rivières moins importantes des Alpes, des Pyrénées et du Massif Central on a construit des barrages qui retiennent l'eau et permettent de produire de l'électricité quand on en a le plus besoin.

Dans de nombreux cas, cependant, ces conditions ne sont pas réunies, et on ne dispose que de petites quantités d'eau, parfois mais pas toujours associées à de grandes hauteurs de chute. On parle alors de "petite hydraulique" ; la puissance de ces unités va de quelques kW à quelques MW. On en recense plus de 1500 en France qui, à elles toutes, représentent environ 10 % de l'énergie hydraulique.

Il faut noter aussi que de nombreux ouvrages hydrauliques ne servent pas qu'à la production d'électricité : beaucoup constituent des réserves d'eau exploitées pour l'irrigation (par exemple Serre-Ponçon en France), d'autres ont pour objet principal la maîtrise des crues. De très nombreux barrages ne sont pas équipés de turbine. Nous n'évoquerons pas ces derniers ici.

Les caractéristiques, les avantages et les inconvénients, l'économie même, de la "grande" et de la "petite" hydraulique, ont assez peu de choses en commun. C'est pourquoi nous les traiterons séparément dans ce chapitre.

IV-2- Les différents types d'ouvrages hydrauliques

IV-2-1- Les bassins versants et le stockage naturel de l'eau

L'énergie hydraulique est une énergie d'origine solaire. L'eau évaporée par la chaleur solaire, pour la plus grande partie sur les grandes étendues d'eau (océans, mers, grands lacs) mais également sur les terres, par évapotranspiration, se condense sous forme de précipitations, et ceci de préférence sur les montagnes. Grâce à ce mécanisme, l'eau gagne une énergie potentielle directement proportionnelle à l'altitude de son point de chute.

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

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

IV -2-2- Les différents types d'aménagements hydrauliques

Chaque site possède ses propres caractéristiques, hydrologiques, géologiques, topographiques, et sera aménagé en fonction de ses caractéristiques et des objectifs poursuivis : fourniture quasi permanente d'électricité, fourniture en période de pointe uniquement, stockage temporaire, etc.. Bien que chaque aménagement hydraulique soit très spécifique du site choisi, les différents aménagements peuvent être classés en quelques grandes familles.

IV- 2-2-1- les aménagements avec retenue

De nombreuses rivières ont un débit très variable au cours de l'année, notamment du fait de la variation saisonnière des précipitations et du stockage naturel de la neige en hiver, et ceci d'autant plus que leur bassin versant est limité. C'est le cas de la plupart des rivières en

altitude, mais également de certaines autres, comme la Durance en France. Lorsque l'on veut exploiter leur potentiel hydraulique, on est amené à construire des barrages qui vont eux-mêmes stocker l'eau lorsqu'elle arrive en abondance, et permettre de la restituer et de la turbiner lorsqu'on en a besoin. Ces barrages ont des hauteurs variables entre quelques dizaines de mètres et largement plus de 100 mètres en fonction de la topographie des lieux et des quantités d'eau à stocker. Ces quantités sont elles-mêmes très variables, de quelques centaines de millions (Tignes) à quelques milliards de m³ (Serre-Ponçon) voire beaucoup plus (barrage Nasser sur le Nil en Egypte ou Kariba sur le Zambèze).

IV -2-2-2-les aménagements "au fil de l'eau"

Lorsque le débit d'une rivière ne varie pas trop au cours de l'année, on choisit généralement de l'équiper "au fil de l'eau", sans créer de retenue. C'est le cas de la plupart des fleuves une fois qu'ils sont arrivés en plaine, avec un débit important mais une faible pente. En France, c'est le cas du Rhône, en aval du Lac Lemman, et du Rhin. L'eau que l'on veut turbiner est en général dérivée dans un canal latéral, sur une distance suffisante pour obtenir une hauteur de chute suffisante (de l'ordre de 10 m.) Sur le Rhin, par exemple, chaque usine, en turbinant environ 1000 m³/s sur une hauteur de 10 à 15 m, a une capacité de 80 à 120 MW ; la pente générale du fleuve permet d'installer une usine de ce type tous les 30 km environ.

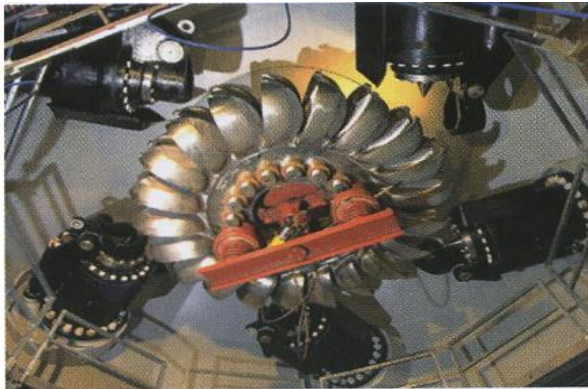
IV- 2-2-3-les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

L'électricité ne peut pas être stockée, aussi cherche-t-on les moyens de stocker de l'énergie sous diverses formes. Une des plus efficaces est de la stocker sous forme d'énergie potentielle de l'eau. En heures creuses, alors que l'on dispose d'une production d'électricité excédentaire, on pompe de l'eau entre un bassin bas et un bassin haut ; en période de pointe, cette eau est turbinée pour fournir de l'électricité. Les hauteurs de chute sont en général très élevées (800 à 1000 m), les capacités des réservoirs (généralement artificiels) étant adaptées aux objectifs poursuivis. En France, la STEP de Revin est capable de fournir une puissance de pointe de 1000 MW environ et celle de Grand'Maison, 1800 MW.

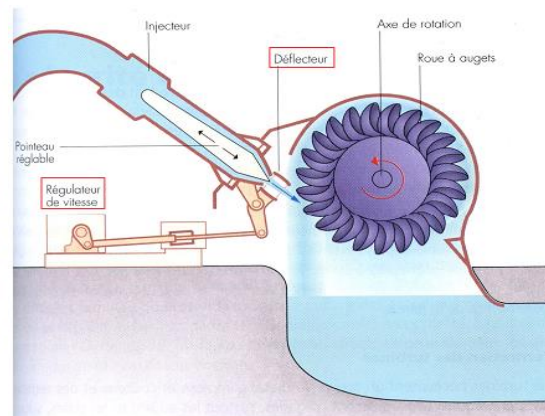
IV -2-2-4-Les différents types de turbines

La turbine va permettre de transformer l'eau qui s'échappe de la conduite en énergie de rotation. La forme et les caractéristiques des turbines dépendent des catégories d'installations hydroélectriques dans lesquelles elles sont employées :

La turbine Pelton, généralement réservée aux usines de haute chute (de 300 à 1800 mètres), a été mis au point par Pelton au XIXe siècle. Cette turbine est constituée d'une roue, sur la périphérie de laquelle sont fixés des séries de cuillères doubles métalliques appelées augets. L'eau sort de la conduite forcée à grande vitesse et vient percuter avec force les augets de la roue par l'intermédiaire des injecteurs. La puissance maximale unitaire atteinte est de 400 MW.



Une des roues Pelton à l'usine de La Batiaz.
Celle dernière est associée à la retenue d'Émosson (658 m de chute). Remarquez les injecteurs latéraux qui dirigent l'eau sur les augets de la roue.



Turbine Pelton. Les roues Pelton tournent dans l'air à la pression atmosphérique sous l'impulsion des jets à très grande vitesse dirigés sur les augets par les injecteurs.

Figure IV-1 Turbine Pelton

La turbine Francis est utilisée pour les moyennes chutes (entre 30 et 750 mètres). Elle ressemble à un cylindre évasé, divisé sur sa longueur par une série de cloisons longitudinales incurvées. Le pourtour élargi de la turbine est cerclé par une couronne percée d'une vingtaine d'ouvertures par lesquelles pénètre l'eau sous pression venant de la conduite forcée. Cette eau glisse sur les pales de la turbine et se dirige vers son cœur, d'où elle est évacuée. Lorsque l'eau s'écoule par les canaux de la turbine, elle abandonne sa pression aux pales de la turbine. C'est cette différence de pression qui est à l'origine de rotation de la turbine. La puissance maximale atteinte est de 800 MW par unité..

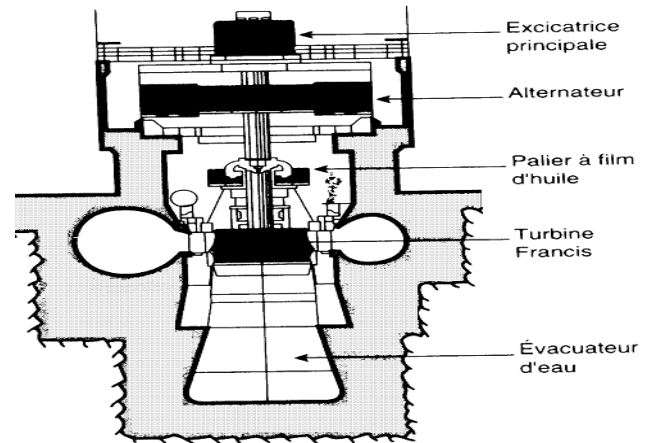
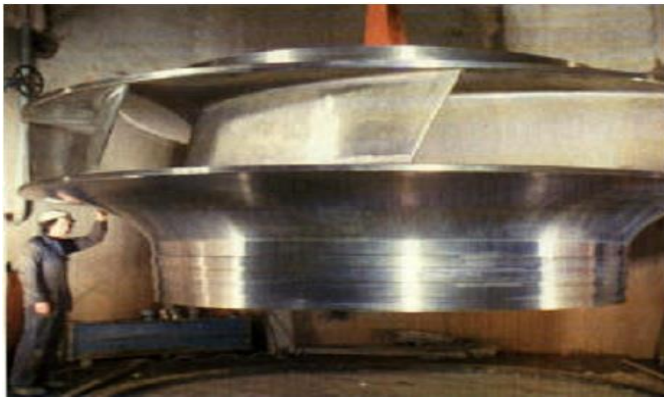
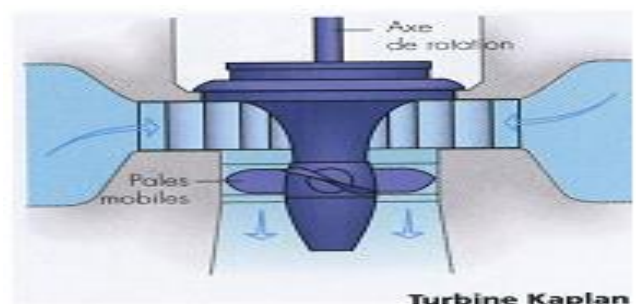
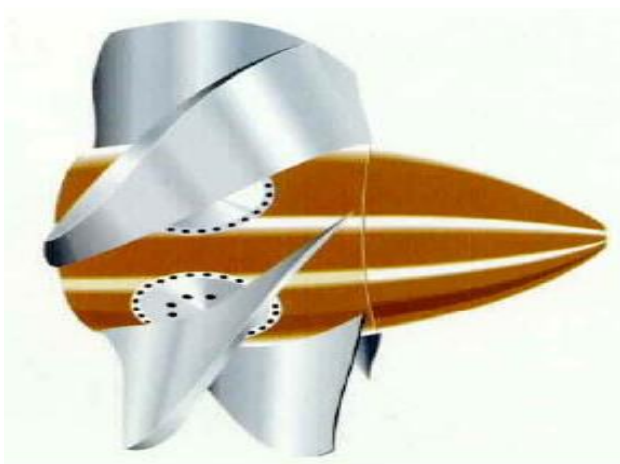


Figure IV-2 Turbine Français

La turbine Kaplan sert dans les usines de basse chute (10 à 80 m) . L'eau est canalisée par des puits ou des conduites en acier ou en béton de cinq à dix mètres de diamètres vers une chambre dont le tracé en colimaçon permet à l'eau d'arriver sur la turbine avec la meilleure efficacité. Les turbines Kaplan ont une forme d'hélices de navire. Leurs pales sont généralement orientables et permettent, par simple variation de leur inclinaison, d'ajuster la vitesse de rotation des turbines aux conditions de niveau. La puissance maximale atteinte est de 200 MW. Une variante des turbines Kaplan est celle des « groupes bulbes », pour les très basses chutes (5 à 20 m) dont la technique a été développée en France pour l'usine marémotrice de la Rance. L'alternateur est accolé à la turbine. Grâce à un système de protection étanche, ces groupes peuvent être complètement immergés dans l'eau. La puissance maximale atteinte est de 60 MW.



Turbine Kaplan
Les turbines Kaplan.
 Les pales des turbines Kaplan sont des pales mobiles dont l'inclinaison est réglable, en fonction du débit et de la hauteur, perm et d'améliorer le rendement.

Figure IV-3 Turbine Kaplan

Pour les STEP, on emploie soit des groupes ternaires (dont la ligne d'arbre comporte la turbine, l'alternateur et la pompe) soit des groupes avec pompes-turbines réversibles capables d'assurer turbinage et pompage (de type Francis).

IV -3 - La grande hydraulique

- **les centrales de haute chute** ont des hauteurs de chute supérieures à 200m; elles utilisant des turbines Pelton.. La capacité du réservoir est relativement faible.

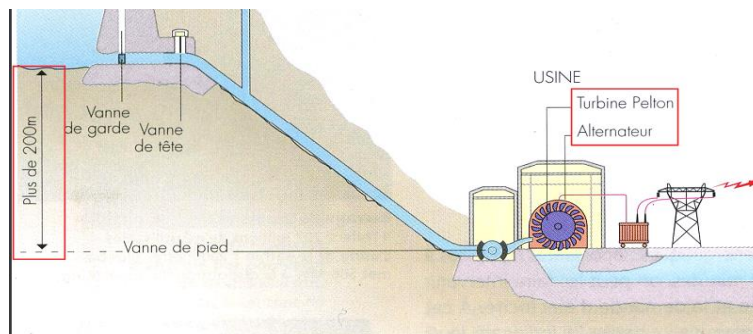


Figure IV-4 le centrale de haute chute

IV-3-1 Situation en 2000

La puissance installée et l'énergie produite par les installations hydrauliques dans le monde sont présentées dans le **tableau IV-1**. Ces chiffres incluent également la "petite hydraulique", mais la part de celui-ci ne dépasse pas quelques %. Figurent également dans le tableau les puissances des installations en cours de construction.

	Amérique Nord et Centrale	Amérique Sud	Europe (ouest & est)	Afrique	Asie	Océanie
Puissance installée (GW)	157	108	171	20	225	11

Electricité produite (TWh)	700	512	567	75	750	42
Puissance en cours de construction (GW)	1.2	14.18	2.2	2,3	84	–

Tableau IV-1 Situation en 2000

La production hydraulique représente plus de 50 % de l'électricité générée dans 61 pays, plus de 80 % dans 31 pays et près de 100 % dans 13 pays.

En Europe, l'hydraulique fournit environ 13 % de l'électricité, et en France près de 15%.

Les grands pays qui ont une stratégie hydroélectrique forte sont notamment la Chine, l'Inde, le Brésil, l'Iran et la Turquie.

IV-3-2 - Avantages et inconvénients

Comme la plupart des activités humaines et industrielles, l'exploitation de l'énergie hydraulique présente des avantages et des inconvénients, tant pour l'environnement, que pour la santé et pour les aspects sociaux.

IV-3-2 -1-pour l'environnement

Les grands aménagements hydrauliques modifient par définition les écosystèmes. Beaucoup de rivières françaises ont été aménagées, souvent dès le Moyen âge par des digues et des moulins, ou par des ouvrages d'art destinés à favoriser la navigation. Peut-on parler d'atteinte à l'environnement ? Probablement pas quand les précautions nécessaires sont prises, par exemple en sauvegardant les zones de frayage, en permettant aux poissons de remonter la rivière jusqu'à eux, et en laissant une quantité suffisante d'eau emprunter le cours normal de la rivière. Il est également essentiel que l'eau qui est turbinée poursuive sa route vers son exutoire normal : les modifications de l'environnement proviennent plutôt de prélèvements importants effectués pour d'autres usages que la production d'électricité, notamment l'irrigation ; l'exemple le plus connu est celui des fleuves qui débouchent dans la mer d'Aral et

y arrivent pratiquement exsangues, ce qui a eu pour effet de provoquer un assèchement de cette mer intérieure. Ceci est d'autant plus absurde que le mauvais drainage des terres agricoles a conduit à gâcher l'eau d'irrigation sans bénéfice agricole.

Un des principaux avantages de l'énergie hydraulique, énergie renouvelable, est que, dans la plupart des cas, elle ne rejette pas de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Si les 20 % d'électricité d'origine hydraulique étaient produits dans des centrales à charbon, les rejets de CO² dans l'atmosphère seraient majorés de 500 à 600 mégatonnes de carbone contenu (600 MtC), alors qu'ils sont déjà beaucoup trop élevés. Dans certains cas, cet avantage risque d'être compensé, au moins de façon transitoire, par des rejets de méthane, gaz à effet de serre plus "efficace" que le CO², mais à durée de vie plus courte. Lorsque la retenue de l'aménagement hydraulique couvre une importante zone à forte végétation, la décomposition des matières végétales produit du méthane rejeté dans l'atmosphère et, consomme l'oxygène contenu dans l'eau qui peut devenir impropre à la vie aquatique. Ce genre de situation est susceptible de se rencontrer dans les zones tropicales avec des retenues de faible profondeur et nécessite des mesures particulières de protection de l'environnement. Ces problèmes ont en général un caractère transitoire.

IV-3-2 -2-pour la santé

L'énergie hydraulique a été dans de nombreux pays, et notamment en Europe, le premier moyen de produire des quantités importantes d'électricité. En France, dès 1960, l'électricité hydraulique, avec 40 TWh, représentait près de 60 % de la production. C'est dire que l'énergie hydraulique a très fortement contribué au redressement économique du pays et, par là même, à l'amélioration de la santé.

Dans les pays à climat tempéré, on ne connaît pas d'effet nocif pour la santé de l'énergie hydraulique. Dans les pays tropicaux, certains aménagements hydrauliques mal conçus conduisent à la diffusion de maladies hydriques, et notamment du paludisme et de la bilharziose (ou schistosomiase). Les problèmes rencontrés sont cependant au moins autant imputables aux réseaux d'irrigation qu'aux retenues des barrages et les traitements préventifs et curatifs existent même s'ils ne sont pas souvent mis à la disposition des populations concernées.

IV-3-2 -3-sociaux

Un des principaux griefs fait à l'énergie hydraulique est qu'il nécessite souvent des déplacements de population. De tout temps, en effet, les rivières et les fleuves ont été des lieux privilégiés d'habitat.

Dans les zones de montagne, il s'agit le plus souvent de hameaux ou de terres à usages agropastoraux. Bien que traumatisant pour les quelques familles affectées, le changement peut être accompagné et il est possible de proposer à ces familles un cadre de vie peu différent que celui qu'elles connaissaient avant, confort en plus ou de les accompagner dans un changement qu'elles peuvent souhaiter ou accepter.

En plaine, les conséquences peuvent être beaucoup plus importantes, et l'impact social plus difficile à maîtriser. La mise en eau du barrage des Trois-Gorges, en Chine, s'accompagne du déplacement de près de 2 millions de personnes. Il s'agit là d'un bouleversement. Mais d'un autre côté, ce barrage permet de maîtriser les crues dévastatrices du Fleuve Jaune, qui bon an mal an, font des milliers de victimes, sans parler des dégâts matériels. Les autorités chinoises ont jugé que le bilan était globalement positif ; mais une des difficultés évidentes est que ceux qui subissent les inconvénients de ce projet ne sont pas les mêmes que ceux qui en bénéficient comme cela arrive souvent pour les grands projets d'infrastructures (aéroports, TGV..).

IV-3-3 - Grande hydraulique et risques industriels

La plupart des activités industrielles comportent des risques.

Dans le cas de la grande hydraulique, ceux-ci sont liés soit à l'énorme énergie potentielle accumulée derrière les barrages de haute chute, soit aux risques de déversement de l'eau contenue dans les canaux qui amènent l'eau aux usines au fil de l'eau et qui surplombent la plaine.

Les points les plus sensibles des grands barrages sont :

- L'appui du barrage sur la fondation naturelle
- Le risque de glissement de terrain dans le lac de retenue, notamment en cas de séisme.

- Le risque de dégradation progressive du barrage lui-même provoqué par des infiltrations d'eau, ou par le vieillissement des matériaux constitutifs.
- Dans le cas des barrages en terre, ou de berges des canaux d'amenée, le risque d'érosion interne et d'apparition de renards, capables de dégénérer rapidement en rupture de l'ouvrage.

Les conséquences d'une rupture de barrage (ou de canal) pourraient être dramatiques pour les installations et les populations qui se trouvent en aval. Aussi, des précautions très importantes sont-elles prises pour assurer la surveillance des points sensibles (surveillance géologique des terrains, détection d'infiltrations d'eau, visites périodiques des ouvrages par des experts), et des plans d'urgence préparés pour assurer dans les meilleures conditions l'évacuation des populations concernées en cas d'alerte.

Malgré tout, même s'ils sont rares, des accidents arrivent : en Europe, le barrage de Malpasset dont la rupture en 1959 a entraîné l'inondation de la région de Fréjus, et le barrage de Vajont en Italie du Nord. Les effets de pluies intenses et de crues supérieures à ce qui était prévu ont causé la grande majorité des accidents de barrages en terre. A Malpasset, c'est la rupture de la fondation en rive gauche qui a été la cause de la rupture brutale du barrage. A Vajont, un glissement majeur de terrain en rive gauche a créé une vague deux fois plus haute que le barrage. Dans le monde, sur les milliers de barrages existants (dont la majorité est à finalité agricole ou d'écrêtage des crues), il y a en moyenne un accident par an ; pour les grands ouvrages destinées à la production d'électricité, peut-être parce qu'ils font l'objet d'une surveillance très stricte, la probabilité d'accident est extrêmement faible.

IV-3-4 -Grande hydraulique et réseau de transport d'électricité

IV-3-4 -1-Le transport de l'électricité

Les grands ouvrages hydrauliques sont réalisés là où c'est possible, et ne sont pas nécessairement à proximité des lieux de consommation. De nombreux cas de figure sont possibles, mais nous n'en retiendrons que trois particulièrement représentatifs :

- Insertion dans un réseau important très haute tension (THT)

En Europe occidentale, et notamment en France, les distances entre les zones de montagne et les lieux de consommation sont certes importantes, mais le réseau THT a progressivement été renforcé et la production hydraulique est écoulee directement dans ce réseau. Cette situation se retrouve, à quelques notables exceptions près, dans la plupart des pays industriels. L'acceptation sociale des lignes THT et leur sensibilité aux vents extrêmes peut conduire les pays riches à développer les lignes enterrées dont le coût est sensiblement plus élevé.

- Transport de l'électricité à grande distance en courant continu

Dans quelques cas, les capacités de production sont à la fois très importantes et très éloignées des lieux de consommation. C'est le cas notamment au Québec et au Brésil. Dans ces deux cas, le transport à grande distance doit se faire en courant continu afin de diminuer les pertes en lignes. Le courant continu est transformé en courant alternatif, pas nécessairement avec la fréquence de départ (50 Hz ou 60 Hz selon les pays) ce qui ne simplifie pas la distribution éventuelle dans les régions traversées.

- Localisation d'industries grosses consommatrices à proximité.

Aux débuts de l'utilisation de l'énergie hydraulique, on a implanté les industries consommatrices dans les vallées de montagne, à proximité des ouvrages. En France par exemple, l'électro métallurgie s'est implantée dans les vallées de la Maurienne et de la Romanche. Aux Etats-Unis, pendant la Deuxième Guerre Mondiale, les usines d'enrichissement de l'uranium, très grosses consommatrices, ont été implantées dans la Tennessee Valley.

La problématique de l'utilisation de l'électricité produite par la grande hydraulique est au cœur du développement de cette forme d'énergie dans les pays en développement. Le potentiel hydraulique de certains de ces pays, en Asie, en Amérique du Sud et en Afrique, est considérable mais les réseaux de transport sont quasi inexistantes. Tout projet de développement doit donc prendre en compte à la fois les ouvrages hydrauliques eux-mêmes, les consommateurs visés, et le transport.

IV-3-4 -2-Le soutien au réseau

Les turbines hydrauliques offrent la possibilité d'une mise en route et d'un arrêt très rapide. Ceci leur confère un intérêt tout particulier pour le réglage fin du réseau THT qui doit souvent faire face à des à-coups de la consommation.

Les STEP permettent de compenser les variations de consommation entre heures de pointes, où elles fonctionnent en turbines, et heures creuses, où elles fonctionnent en pompe pour remonter l'eau précédemment turbinée.

Enfin les barrages servent à stocker l'énergie, sous forme d'énergie potentielle de l'eau, d'une saison sur l'autre, et donc de faire face à des périodes de forte consommation (dans le cas de l'Europe occidentale, l'eau de la fonte des neiges est souvent stockée pour être utilisée en hiver).

IV-3-5- Economie

L'énergie hydraulique est caractérisée par des investissements élevés, mais des coûts de fonctionnement très faibles, car le "combustible" est gratuit et l'entretien réduit.

Les dépenses d'investissements dépendent très fortement des caractéristiques de l'aménagement, et des dépenses annexes liées aux problèmes sociaux et environnementaux. Il est de ce fait pratiquement impossible de donner des chiffres normatifs.

A titre d'exemple, on peut considérer qu'un coût d'investissement de 1000 \$ par kW installé correspond à un site favorable. Le coût d'investissement d'une centrale complète utilisant une turbine à gaz à cycle combiné est d'environ 300 \$ par kW installé auxquels il faut ajouter le prix du gaz, soit entre 20\$ et 30\$ par MWH produit.

Une fois amortis, les aménagements hydrauliques procurent une rente très importante, compte tenu de leurs très faibles coûts d'exploitation.

IV-3-6 Potentiel et perspectives de développement

Le potentiel hydraulique techniquement réalisable dans le monde est considérable. Encore faut-il que l'électricité produite ait des clients, et qu'elle puisse leur être amené à un coût

compétitif avec les autres formes d'énergie. On est donc amené à distinguer entre le "techniquement faisable" et l'"économiquement faisable" dans les conditions actuelles (tableau IV-2)

Potentiel	Techniquement faisable (TWh/an)	Economiquement faisable (TWh/an)
Amérique du Nord et Centrale	1660	1000
Amérique du Sud	2665	1600
Asie	6800	3600
Afrique	1700	1000

Tableau IV-2 Potentiel et perspectives de développement

On constate qu'il y a un écart important entre ce qui est techniquement faisable et ce qui l'est économiquement. Cet écart peut être dû soit aux inconvénients de tel ou tel aménagement, au coût trop élevé d'un ouvrage, à l'absence de clients à proximité, ou aux difficultés de financement, quelles qu'en soient les raisons (instabilité politique de la région, politique des institutions financières, etc.)

Le potentiel "économiquement faisable" est cependant considérable, environ le triple de la production actuelle en Amérique du Sud, près de cinq fois en Asie, et plus de 13 fois en Afrique. Il est par contre quasi nul en Europe, et limité en Amérique du Nord et Centrale. Nous reviendrons sur le cas des pays pauvres et émergents (Amérique du Sud, Asie et Afrique) dans la conclusion de ce chapitre.

IV-4 - La moyenne hydraulique

- **les centrales de moyenne**

les centrales de moyenne chute ont des hauteurs comprises entre 30m et 200m; elles utilisant des turbines Francis. Ces centrales sont alimentées par l'eau retenue derrière

un barrage construit dans le lit d'une rivière de région montagneuse. Elles comportent un réservoir de grande capacité

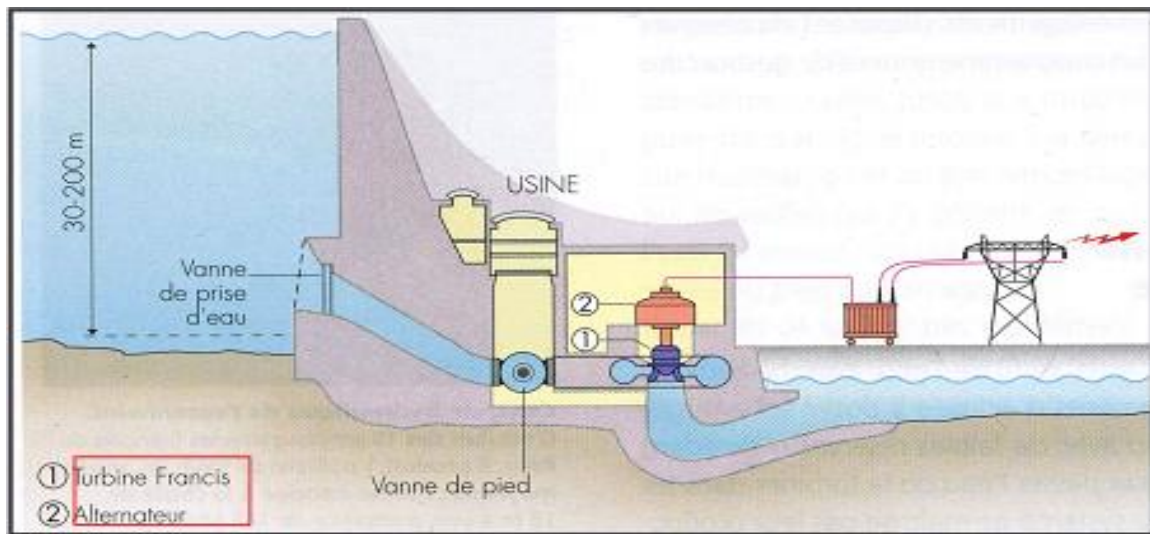


Figure IV-5 la centrale de moyenne

IV-5 - La petite hydraulique

- **les centrales de basse chute**, ou centrales au fil de l'eau, ont des hauteurs de chute inférieures à 30m; elles utilisent des turbines Kaplan ou Francis. Ces centrales sont établies sur les fleuves ou les rivières à fort débit

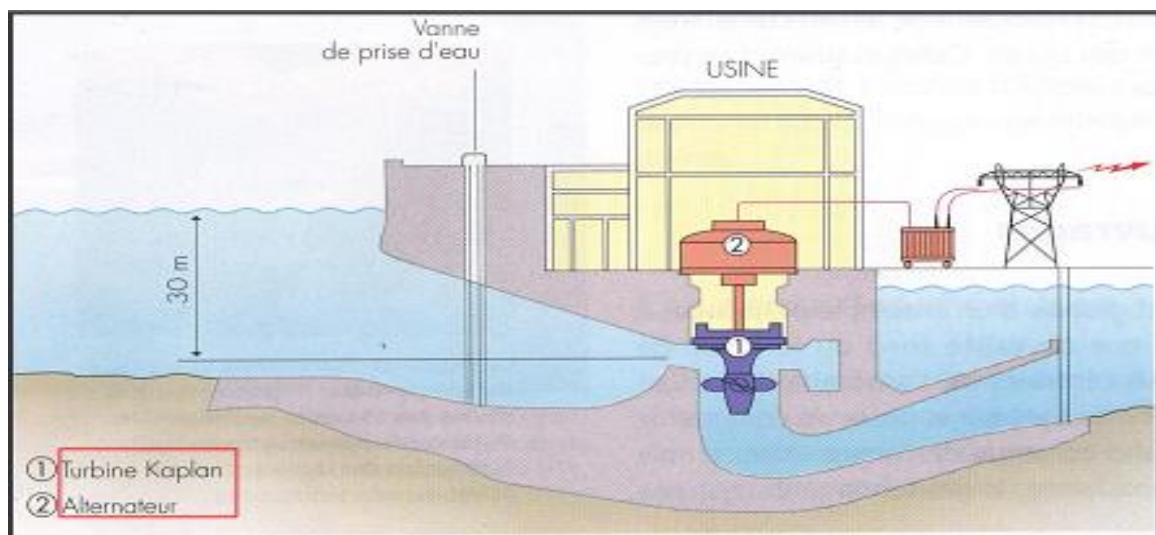


Figure IV-6 la centrale de basse

Le terme de « petite hydraulique » désigne communément des installations de capacité inférieure ou égale à 10 MW (petites centrales hydroélectriques ; PCH). Ce seuil, lié à des

considérations administratives ou juridiques, diffère selon les pays : au Brésil ou en Chine, ces limites peuvent atteindre 50 MW.

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

En France, les catégories d'installation qui peuvent bénéficier de l'obligation d'achat en application des directives européennes, concernent néanmoins les installations d'une puissance installée inférieure ou égale à 12 MW.

IV-5-2 - Avantages et inconvénients

IV-5-2 -1-Les avantages et inconvénients pour l'environnement

Les petites centrales hydrauliques ne rejettent aucun déchet dans l'eau, n'affectent pas la qualité de l'eau (centrales « fil de l'eau ») et n'émettent aucun gaz à effet de serre. Le CIDFER (Centre d'Information sur l'Energie et l'Environnement) estime qu'une centrale de 1 MW produisant 5 GWh évite chaque année l'émission d'environ 5000 tonnes de CO₂ (1300 tonnes de C contenu) par rapport à une centrale à combustion classique (sans parler des émissions d'oxydes de soufre et d'azote). Leur développement participe donc à la lutte contre l'effet de serre et va dans le sens d'un développement durable.

Au niveau local, les impacts visuels et les nuisances sonores constituent des aspects à surveiller. Les équipements actuels permettent de limiter ces nuisances.

La perturbation des cours d'eau et de la vie aquatique constitue un autre impact qui impose des mesures adaptées : maintien d'un débit permettant la vie, la circulation et la reproduction des espèces ; dispositifs de franchissement le cas échéant pour les poissons migrateurs ; respect des pratiques et des usages sur le cours d'eau.

IV-5-2 -2-Les avantages sociaux

Energie décentralisée, la petite hydroélectricité maintient ou crée une activité économique dans les zones rurales. Elle constitue une source de revenus pour les communes, une fois les installations amorties.

L'industrie européenne de la petite hydraulique représente environ 10000 emplois pour un chiffre d'affaires de l'ordre de 400 millions d'euros (EurObserv'ER). En ce qui concerne le poids économique des exploitants, le CIDFER le situe en France à environ 300 millions d'euros et 2500 emplois.

IV-5-3-Petite hydraulique : une production décentralisée

La petite hydraulique est particulièrement adaptée à la production décentralisée étant donné ses capacités d'adaptation en terme de puissance installée. Pour les sites localisés à proximité d'une ressource hydraulique, les PCH peuvent permettre l'auto-alimentation de bâtiments agricoles, industriels ou domestiques. En France, des dispositifs d'aides spécifiques existent pour l'électrification des sites isolés, en milieu urbain ou rural. Le CIDFER mentionne que sur l'ensemble des filières énergies renouvelables, un millier de sites ont été subventionnés à ce jour, permettant d'éviter la construction de 1200 km de lignes électriques.

IV-5-4 -Perspectives de développement

IV-5-4 -1-Une réglementation européenne très volontariste pour le développement de l'énergie renouvelable

Les perspectives de développement de la petite hydraulique en Europe sont étroitement liés au contexte réglementaire constitué par la directive européenne 2001/77/CE du 27 septembre 2001 qui constitue le texte de référence en matière d'énergie renouvelable. La directive comprend notamment les points suivants :

- La directive fixe un objectif global de 22 % pour la part d'électricité renouvelable consommée dans l'Union en 2010. En ce qui concerne la France, cet objectif est de 21% (**tableau IV- 3**), alors que la part d'électricité renouvelable atteint 15% en 1999 ;

- Un régime de soutien pour le développement des sources d'énergie renouvelables sera appliqué dans chacun des états membres, pour compenser le fait que les énergies « classiques » n'internalisent pas les coûts externes liés aux effets sur la santé et l'environnement.
- Un mécanisme de garantie d'origine de l'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables sera appliqué au plus tard le 27 octobre 2003. La garantie d'origine ne garantit pas forcément l'accès au régime de soutien ;
- Les états membres prennent les mesures nécessaires pour faire en sorte que les opérateurs de systèmes de transport et de distribution présents sur le territoire garantissent le transport et la distribution de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables.

	2000	2010
Consommation intérieure d'électricité	450 TWh	550 TWh (hyp : croissance de 1-2% par an de la consommation d'électricité)
Part de l'énergie renouvelable (21%)	77,4 TWh	115 TWh
Dont hydraulique (grande, petite et pompage)	73,6 TWh	70 TWh
Dont énergies nouvelles renouvelables	3,8 TWh (déchets urbains, déchets bois, éolien -0,1 TWh-, géothermie - 0,021 TWh)	45 TWh <i>soit 36 TWh supplémentaires</i>

Tableau IV-3 DGEMP : objectifs de la France pour l'électricité renouvelable

IV-5-4 -2-Des tarifs d'achat incitatifs

En ce qui concerne le régime de soutien, en France, la publication au J.O. de l'arrêté du 25 juin 2001 pris en application du décret n° 2000-1196 du 6 décembre 2000 et du décret n° 2001-410 du 10 mai 2001 constitue une étape importante pour les PCH.

Cet arrêté prévoit des contrats d'une durée de 20 ans et fixe les tarifs d'achat de l'électricité produite par des installations hydroélectriques qui bénéficient de l'obligation d'achat instituée par la loi du 10 février 2000.

Le tarif est fixé à 6,10 c€/kWh pour les nouvelles installations de puissance inférieure à 500 kVa et 5,49 c€/kWh pour les puissances supérieures ; une prime comprise entre 0 et 1,52 c€/kWh en hiver, selon la régularité de la production, peut s'y ajouter.

Selon le rapport annuel 2001 de la Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, « ces tarifs représentent un effort important de la collectivité en faveur de l'énergie hydraulique : ils entraîneront, pour une nouvelle puissance installée de 600 MW, une charge de l'ordre de 90 M€ par an en 2010 pour le fonds du service public de la production d'électricité ».

Ces tarifs constituent un facteur de stabilité pour la filière et devraient renforcer l'attrait des compagnies électriques européennes pour la petite hydraulique, ces compagnies devant par ailleurs anticiper la contrainte de produire une part de leur courant à partir de sources renouvelables.

IV-5-4 -3-Les facteurs limitants

Paradoxalement, alors que les PCH répondent globalement à une meilleure prise en compte de l'environnement (notamment sur la limitation de l'émission de gaz à effet de serre), le développement est limité au niveau local par des considérations environnementales relatives à la protection de la faune et de la flore.

La profession estime en effet avoir de grandes difficultés pour obtenir des autorisations administratives, en raison de l'article 2 de la loi du 16 octobre 1919 modifiée, qui a institué la faculté de classer des cours d'eau sur lesquels aucune autorisation hydroélectrique ne serait plus donnée. Ce classement est effectué par le Conseil Supérieur de la Pêche.

Des mesures sont en discussion à l'heure actuelle dans le cadre d'un groupe de travail interministériel pour l'examen d'un processus de simplification des procédures administratives. Des procédures clarifiées ou des actions de formation sont ainsi attendues pour l'éolien et l'hydraulique.

IV-5-4 -4-La contribution de la petite hydraulique aux objectifs de production d'électricité d'origine renouvelable

L'ADEME, le Syndicat des Energies Renouvelables et la DGEMP ont élaboré des scénarios de développement pour la production d'électricité renouvelable à l'échéance de 2010. En ce qui concerne les PCH, ce développement représenterait environ 5 TWh, pour 1000 MW de puissance nouvelle installée (**tableau IV-4**).

Energies nouvelles renouvelables	Objectif	Contribution	Remarque
Objectif global	45 TWh		
Eolien		Env. 20-30 TWh (hyp : 10000 MW installés) env. 10-15 TWh (hyp : 5000 MW installés)	Durée de fonctionnement : 2000 heures par an pour la plupart des installations ; 3000 heures/an dans certains cas peu nombreux
Petite hydraulique		Env. 5 TWh (1000 MW installés)	Durée de fonctionnement : 5000 h/an
Biomasse		Env. 10-20 TWh	Production d'électricité avec biomasse (bois essentiellement, déchets ménagers)
Géothermie et autres		1 TWh	
Total		25-40 TWh	

Tableau IV-4 La contribution de la petite hydraulique aux objectifs de production d'électricité d'origine renouvelable

Néanmoins, l'objectif de 1000 MW de puissance installée risque d'être difficile à atteindre sans modification des conditions administratives actuelles pour l'installation de nouveaux équipements, ce qui constitue une revendication de la profession.

IV-6-Conclusions

L'énergie hydraulique a joué dans le passé un rôle essentiel dans le développement industriel de nombreux pays, dont la France. Aujourd'hui encore, le potentiel hydraulique économiquement réalisable permettrait une production annuelle d'électricité de 7200 TWh, soit près de 3 fois supérieure à ce qui est en service.

L'essentiel de ce potentiel correspond à la grande hydraulique, bien adaptée à une production d'électricité de masse, mais nécessitant des investissements élevés. Ce potentiel se trouve en grande majorité dans des pays pauvres ou émergents, et ne pourra être réalisé que moyennant l'aide financière des grandes institutions internationales (Banque Mondiale, Agences de crédit à l'exportation...). Or celle-ci est de plus en plus difficile à obtenir du fait d'interrogations sur les effets relatifs à l'environnement et sur les populations déplacées et de la difficulté de trouver un accord entre la volonté de développement durable des pays émergents et la manière dont les pays riches projettent leurs préoccupations environnementales et sociales dans ces mêmes pays.

La petite hydraulique est, quantitativement, beaucoup moins importante. Mais elle permet une production décentralisée et bien adaptée aux besoins de développement des économies rurales, notamment dans les pays pauvres ne disposant pas de réseaux de transport d'électricité.

Energie renouvelable, l'énergie hydraulique ne rejette pas de gaz à effet de serre. Aujourd'hui, avec une production annuelle de 2600 TWh, elle permet d'éviter de rejeter sous forme de CO² environ 0,5 Gt de Carbone, dont 90 % grâce à la grande hydraulique. Il est surprenant que cet atout de la grande hydraulique ne soit reconnu ni par les grandes institutions internationales, ni par le protocole de Kyoto sur les effets climatiques.

Chapitre V : Autres formes d'énergies renouvelables

V-1-Introduction

Les énergies fossiles regroupent les énergies produites à partir du pétrole, du gaz naturel ou du charbon, carbonates fossiles accumulés par la captation par le vivant du carbone qui s'est ensuite fossilisé en partie sous la forme d'hydrocarbures. La formation des stocks ou réservoirs d'hydrocarbures prend quelques dizaines de millions d'années, d'où le classement des combustibles fossiles dans la catégorie des ressources naturelles non renouvelables (Gallez, 2007). Il en est de même pour l'énergie nucléaire actuelle, issue de la fission des atomes d'uranium, puisque la réserve d'uranium disponible sur Terre est limitée. Seul le réacteur à fusions (utilisant des isotopes de l'hydrogène présents dans l'eau des océans de façon quasi illimitée à l'échelle humaine), en cours d'expérimentation, serait un moyen de production d'énergie utilisant une énergie renouvelable.

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil, mais aussi la Lune et la Terre. Les énergies solaire, éolienne, hydraulique, marémotrice, géothermique et de biomasse en sont les formes les plus courantes. Hormis l'énergie marémotrice provenant des forces d'attractions combinées du Soleil et de la Lune, toutes les énergies renouvelables ont donc pour origine l'énergie nucléaire naturelle, provenant soit du soleil, due à la fusion nucléaire de l'hydrogène, soit de la Terre, due à la désintégration naturelle des roches de la croûte terrestre.

V-2-Énergie géothermique

L'énergie géothermique est issue de l'énergie de la terre. Il s'agit d'extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Il existe un flux géothermique naturel à la surface du globe, mais il est si faible qu'il ne peut être directement capté. En réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous-sol (nappes d'eau) en faisant un ou plusieurs forages, plus ou moins profond(s) selon la température désirée ou le gradient thermique local. Il existe trois types de géothermie dépendamment du niveau de température disponible à l'exploitation (Figure V-1) :

- La géothermie à haute énergie exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité et peut être couplée à une valorisation de la chaleur par cogénération, améliorant ainsi très sensiblement le rendement de l'installation. Elle est parfois subdivisée en deux sous-catégories :

- la géothermie moyenne énergie (aux températures comprises entre 100 et 150 °C) par laquelle la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire ;
- la géothermie haute énergie (aux températures supérieures à 150 °C), qui permet la production d'électricité grâce à la vapeur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine.
- La géothermie à basse énergie correspond à une géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100 °C. La principale utilisation est les réseaux de chauffage urbain.
- La géothermie à très basse énergie répond à une géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30 °C. Les principales utilisations sont le chauffage et la climatisation individuelle par dispositifs thermodynamiques, généralement fonctionnant à l'électricité.

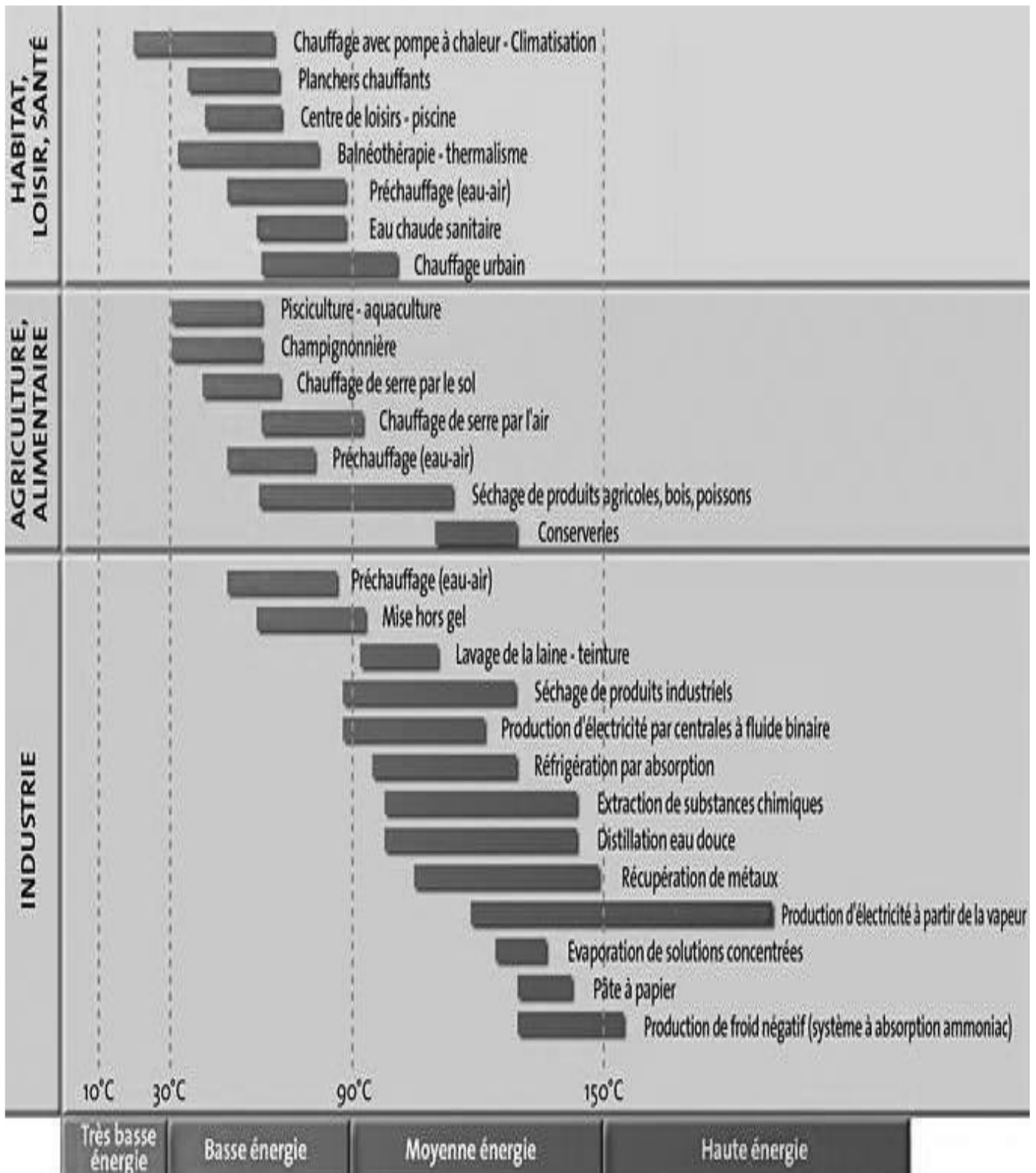


Figure V-1 Principales utilisations de la géothermie en fonction des températures (Tiré de ADEME-BGRM, 2007)

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie) présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou sur le réseau de distribution de l'énergie.

La chaleur du sous-sol est présente sur tous les continents. Selon la structure des formations géologiques ou la composition des roches, cette énergie est plus ou moins facile à extraire, mais les technologies existent aujourd'hui pour permettre un développement planétaire de la géothermie. Les États-Unis sont le premier producteur mondial d'énergie géothermique (Futura-Sciences, 2006). En Afrique, il existe un énorme potentiel géothermique et en utilisant la technologie actuelle, la production d'électricité pourrait atteindre 9000 MW (Karekezi et al., 2007).

Une exploitation géothermique produit peu de rejets. En effet la quantité moyenne de CO₂ émise dans l'atmosphère par les centrales géo-thermo-électriques dans le monde (estimation faite sur 73% du parc mondial) est de 55 g/kWh, alors qu'une centrale au gaz naturel en produit 10 fois plus. Ce niveau peut être ramené à des valeurs nulles par la réinjection des fluides géo-thermaux dans les réservoirs dont ils sont issus. Cependant, les centrales géothermiques sont fortement consommatrices d'eau, ce qui constitue un véritable obstacle dans les régions arides (Futura-Sciences, 2006). En outre, les installations géothermiques peuvent déclencher des séismes de magnitude pouvant aller jusqu'à 4,6.

V-3- Énergie marine

Les océans sont des milieux fluides riches en flux énergétiques exploitables sous diverses formes regroupées sous l'appellation d'énergie marine : l'énergie houlomotrice, l'énergie marémotrice, l'énergie des courants de marée, l'énergie thermique des mers et l'énergie osmotique (Gallez, 2007).

V-3-1- Énergie de la houle

L'énergie houlomotrice est une énergie mécanique potentielle. La houle correspond à une succession de vagues régulières. La puissance mise en jeu dépend de la hauteur des vagues et du temps qui sépare en un endroit donné le passage de deux vagues successives. Beaucoup de procédés ont été proposés pour capter, concentrer et transformer cette énergie naturelle en énergie utile.

V-3-2- Énergie marémotrice

L'énergie marémotrice est issue du mouvement de l'eau créé par les marées, causées par l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil.

L'énergie marémotrice n'est pas nouvelle : les premiers moulins à marée ont été construits au Moyen-Âge en Bretagne (France).

L'énergie marémotrice peut être captée sous deux formes : soit en énergie potentielle (en exploitant les variations du niveau de la mer), soit en énergie cinétique (en exploitant les courants de marée, captés par des turbines ou hydroliennes). Les sites adaptés au captage de l'énergie marémotrice sont peu nombreux ; ils se concentrent dans les régions où, du fait notamment des conditions hydrodynamiques, l'amplitude de l'onde de marée est amplifiée. L'exploitation optimale de l'énergie potentielle nécessite des aménagements importants dans un environnement salin hostile, qui modifient notablement les équilibres écologiques dans des zones généralement fragiles.

La façon la plus pratique de produire l'énergie marémotrice demeure le vieux moulin à marée qui consiste à isoler de la mer un estuaire ou un bassin de marée à l'aide d'une installation comportant une centrale électrique, une section d'écluses et une section de digues résistantes. À marée haute, les écluses sont fermées et la marée descendante crée une différence entre le niveau du bassin et celui de la mer. Lorsque cette différence devient suffisante, on laisse l'eau circuler dans les turbogénérateurs jusqu'à ce que la différence entre les niveaux soit trop faible pour actionner les turbines. Lorsque la marée change et que le niveau de la mer recommence à monter, on ouvre les écluses pour que le bassin se remplisse et on passe ainsi à un autre cycle de production électrique. Ces cycles se produisent deux fois par jour puisque chaque jour lunaire compte deux marées montantes et deux marées descendantes. Grâce à de nouvelles technologies, on peut concevoir des turbines qui produisent de l'électricité ou qui agissent comme des pompes pendant les deux phases de la marée (Clark, 2007).

Le captage de l'énergie cinétique des courants de marée est actuellement prospecté. Pour être exploitables, les courants doivent dépasser 3 noeuds sur des durées importantes. La technologie de l'hydrolienne (Figure V-2) est une turbine sous-marine, qui utilise l'énergie cinétique des courants marins, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique de l'air. La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique, qui est alors transformée en énergie électrique par un alternateur. Toutefois, la technologie des hydroliennes en est à un stade expérimental.

V-3-3- Énergie thermique des mers

L'énergie maréthermique est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans. En effet, les mers et les océans se

comportent comme un gigantesque capteur pour le rayonnement solaire (de façon directe par l'absorption du flux solaire absorbé, ou de façon indirecte par rayonnement de la Terre réfléchi par l'atmosphère terrestre) et pour l'énergie du vent (elle-même dérivée de l'énergie solaire). Bien qu'une partie de cette énergie soit dissipée (courants, houle, frottements, etc...) une grande partie réchauffe les couches supérieures de l'océan. La différence de température peut être exploitée par une machine thermique, qui utilise l'eau venant des profondeurs, comme source froide, et l'eau de surface comme source chaude, pour produire de l'énergie.

À priori, l'exploitation de la différence de température entre surface et fond n'est envisageable que dans les zones intertropicales. Ailleurs, la différence de température entre la surface et le fond est insuffisante pour obtenir un rendement suffisant, et donc une puissance suffisante pour pomper l'eau froide à grande profondeur et alimenter une machine thermique, dont le rendement dépend de la différence de température entre la source chaude et la source froide. Bien que la production d'énergie maréthermique ne fait pas intervenir de combustion (pas de rejet de dioxyde de carbone), l'utilisation fréquente de chlore pour éviter le développement des dépôts marins peut endommager les écosystèmes.

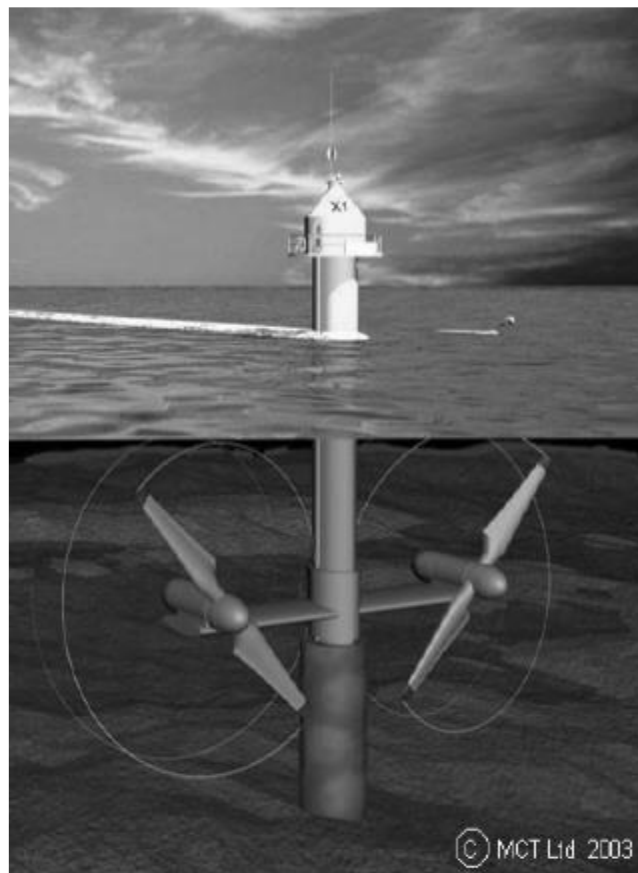


Figure V-2- Vision artistique d'une hydrolienne munie de 2 rotors (Projet Marine Current Turbines Ltd)

V-4- Énergie de biomasse ou bois-énergie

La biomasse provenant de matériaux végétaux et animaux peut produire de la chaleur et de l'énergie. Le brûlage de la biomasse pour obtenir de l'énergie produit des émissions qui sont nettement moins nocives que les sources traditionnelles de production d'énergie.

La combustion du bois, ou autres combustibles traditionnels, pour chauffer, éclairer, cuisiner et déshydrater ou fumer les aliments pour mieux les conserver est une des pratiques les plus anciennes de l'humanité. Une combustion lente et partielle du bois avec un apport minime d'oxygène permet de produire du charbon de bois, qui fournit plus de chaleur que le bois et représente une source d'énergie plus compacte.

La valorisation énergétique du bois est donc une source d'énergie renouvelable à condition de bien gérer les forêts. C'est une énergie, dont le coût est compétitif et dont le prix varie peu, qui est moins polluante que les énergies fossiles, puisque d'une part il n'y a pas de rejets de soufre dans les fumées et d'autre part le CO₂ rejeté dans l'atmosphère correspond à la quantité de CO₂ absorbée par les arbres pendant leur croissance. Cette énergie est disponible par le biais de trois sources principales : le bois issu de la forêt ; les résidus des entreprises de transformation du bois ; et le bois récupéré, provenant des déchetteries à condition qu'il ne soit pas souillé.

De plus, la valorisation énergétique du bois peut être créatrice d'emplois locaux, avec quatre fois plus d'emplois créés que lors de la production du gaz ou du pétrole, permettant aussi l'entretien des espaces verts et des forêts (Hespul, 2007).

De nos jours, les usages de biomasse combustible sont très variés. Les centrales électriques ou la cogénération sont des centrales de 1 à 20 MW alimentées avec différents types de biomasse, tels que des résidus agricoles, le bois et les déchets de bois, les parties fermentescibles des déchets ménagers (incinérateurs). Il existe aussi des centrales « bi combustibles » pour lesquelles la biomasse représente une part seulement de l'alimentation. C'est le cas notamment des centrales « bagasse-charbon » dans les régions de production de canne à sucre.

La production électrique installée est de 44 GW, dont 55% proviennent des pays en voie de développement, 18% de l'Europe et 16% des États-Unis.

Les chaudières individuelles, ou alimentant des réseaux de chaleur, sont en plein développement dans les pays industrialisés, notamment en Europe. Leur efficacité est en nette amélioration depuis une dizaine d'années. Elles sont notamment alimentées par les déchets de l'industrie du bois ou les résidus forestiers sous forme de plaquettes, granulés, ou bûchettes.

Les foyers de cuisson sont alimentés par du bois, du charbon de bois, de la tourbe ou des excréments séchés d'animaux. Les programmes de diffusion de « foyers améliorés » (amélioration du rendement de combustion) pour les ménages ruraux ou péri-urbains des pays en voie de développement connaissent un certain succès puisque 220 millions de ces foyers sont aujourd'hui en fonctionnement, dont 180 millions en Chine, 34 millions en Inde et 5 millions en Afrique.

V-5-Biométhane ou biogaz

Le terme « biométhane » désigne la version renouvelable d'origine biologique du méthane, composé majoritaire du biogaz, qui est issu de la fermentation anaérobie, ou méthanisation, de matières organiques animales ou végétales. Cette fermentation se produit naturellement (dans les marais, les amas de fumier) ou spontanément dans les décharges contenant des déchets organiques, mais il est possible de la provoquer artificiellement dans des digesteurs (pour traiter des boues d'épuration, des déchets organiques industriels ou agricoles, etc...).

Le biogaz est un mélange composé essentiellement de méthane (typiquement 50 à 70%) et de gaz carbonique, avec des quantités variables d'eau et d'hydrogène sulfuré (H₂S). Il est possible de retrouver d'autres composés provenant de contaminations, en particulier dans les biogaz de décharges.

L'énergie du biogaz provient uniquement du méthane : le biogaz est ainsi la forme renouvelable de l'énergie fossile très courante qu'est le gaz naturel, qui lui contient essentiellement du méthane mais aussi du butane, du propane et d'autres éléments. Ainsi, le biogaz peut se substituer directement dans les usages actuels du gaz naturel (tels que l'électricité, la chaleur à haute et basse température, la cogénération) et même être, après traitement, injecté dans les réseaux de gaz comme l'électricité renouvelable dans les réseaux électriques. La valorisation du biogaz sert aussi dans les serres pour les chauffer et les enrichir en CO₂.

Les ressources en matières organiques valorisables par méthanisation sont extrêmement importantes et bien réparties sur la planète. Le principal enjeu est donc la capacité à diffuser les différentes technologies disponibles. Aujourd'hui, on compte trois principaux types d'installations :

- Les unités de méthanisation couvrent une large gamme d'applications et de taille : boues urbaines, déchets municipaux, effluents industriels, déjections d'élevage, cultures énergétiques. Les tonnages traités varient de 1000 à 100000 tonnes de substrat par an.

- Les digesteurs familiaux : Il s'agit de cuves maçonnées, ou de ballons en matière synthétique, ne nécessitant pas pour leur exploitation et leur entretien une main d'œuvre qualifiée. Ces digesteurs ont des tailles très variables, de 1 m³ pour les usages domestiques à 2000 m³ pour les installations commerciales, mais la taille moyenne aujourd'hui est de 6 à 8 m³. Environ 21 millions de foyers sont équipés de digesteurs domestiques, principalement en Asie, dont 17 millions en Chine.
- Le biogaz de décharge : Le stockage de déchets ménagers en décharge provoque naturellement la formation de biogaz. La récupération de ce méthane réduit les nuisances et les risques. La valorisation de ce biogaz sous forme d'électricité ou par injection dans les réseaux commence à se développer.

Concernant les véhicules au biogaz, même s'il n'y en a aujourd'hui que quelques dizaines de milliers dans le monde, il n'y a aucun problème technologique pour adapter les moteurs au biogaz.

Au niveau local, la méthanisation représente un complément d'activité pour les agriculteurs, qui peuvent valoriser économiquement et énergétiquement les déchets agricoles. Pour l'environnement, la valorisation du biogaz apporte une réponse énergétique et écologique au problème du traitement des déchets organiques et des gaz à effet de serre (méthane et gaz carbonique). En brûlant, le biogaz issu de la méthanisation réduit de 20 fois la pollution des gaz issus de la fermentation. La méthanisation représente donc une activité de dépollution (Hespul, 2006).

Cependant, le coût de l'investissement représente le premier obstacle à la mise en place d'une installation productrice de biogaz. La méconnaissance de cette technique représente le second handicap de la méthanisation. Une sensibilisation du public concerné permettrait d'attirer l'attention sur cette nouvelle énergie fortement prometteuse tant à un niveau économique que écologique (Hespul, 2006).

V-6- Biocarburant

Les biocarburants sont des carburants produits à partir de matériaux organiques renouvelables et non fossiles. Le marché des biocarburants de première génération est aujourd'hui en plein essor, dû à la volonté des États de réduire la dépendance au pétrole, leur souhait de promouvoir des énergies à faible contenu en carbone et, dans certaines régions, la nécessité de trouver de nouveaux débouchés aux secteurs agricoles.

Il existe différents types de biocarburants de première génération, qui peuvent être produits à partir de diverses techniques :

- La filière huile (biodiesel) ;
- La filière alcool (éthanol) ;
- La filière gaz (biogaz) ;
- La filière charbon de bois (carburants solides).

Pour utiliser les biocarburants dans les moteurs, deux approches sont possibles. Soit le biocarburant est traité pour s'adapter aux moteurs conçus pour fonctionner avec des dérivés du pétrole. C'est actuellement la stratégie dominante, mais elle ne présente pas le meilleur bilan énergétique et environnemental. Soit il faut adapter le moteur au biocarburant naturel, non transformé chimiquement. La substitution peut être totale ou partielle. Cette stratégie permet une production locale des carburants.

Un inconvénient majeur pour le développement des carburants de première génération est qu'ils entrent en compétition avec les cultures alimentaires. Le caractère durable de la production de biocarburants peut être effectivement mis à mal si elle est réalisée de manière intensive à cause d'une consommation de grandes quantités d'eau, de la pollution des eaux par l'usage d'engrais et de pesticides, et de l'épuisement des sols (Grundmann, 2007). De nouvelles filières à vocation purement énergétique, avec de meilleurs rendements et plus intéressantes sur le plan environnemental, émergent progressivement. Les filières de deuxième génération s'intéressent particulièrement à la transformation de la lignine et la cellulose des végétaux (paille, bois, déchets divers) en alcool ou en gaz. Les recherches concernent aussi la culture de algues microscopiques (ou microalgues) pour l'extraction d'huiles. Les biocarburants issus des microalgues pourraient être produits avec de meilleurs rendements, rendant ainsi envisageable une production de masse sans déforestation massive ni concurrence avec les cultures alimentaires (Baldos, 2007). De plus, comme la croissance des microalgues doit s'effectuer avec une concentration en CO₂ d'environ 13%, les microalgues pourraient servir de « piège à carbone » pour des centrales thermiques au charbon, au gaz naturel, au biogaz, ou à une unité de fermentation alcoolique (Baldos, 2007). À noter que la croissance des microalgues est également possible dans les conditions atmosphériques naturelles, mais les rendements sont alors beaucoup plus faibles.

V-7- Conclusion

Le potentiel des ressources énergétiques marines est immense et leur variété est telle que l'on peut envisager dans la plupart des régions du globe une participation tout à fait significative à la production mondiale d'électricité, mais également d'hydrogène, d'eau douce, de froid... Les solutions technologiques sont encore en pleine évolution. La plupart d'entre elles n'a pas

encore été confrontée aux contraintes de la nature et du marché et il reste encore généralement un travail considérable de recherche et de développement. Compte tenu, des courbes d'apprentissage économique à peine amorcées, le potentiel de baisse des coûts d'investissement de la plupart des technologies marines est très élevé, ce qui laisse entrevoir des coûts de production très attractifs à terme. Ainsi, il est surtout important de développer une volonté politique suffisante pour expérimenter le plus rapidement possible dans les conditions réelles et difficiles du milieu marin, en prenant évidemment des risques. En effet, comme dans tous les autres domaines, il faudra des échecs (constructifs) pour progresser et atteindre une réelle maturité industrielle.

Conclusion générale

L'expression « énergie renouvelable » regroupe un ensemble de filières énergétiques inépuisables à l'échelle humaine, qui se présentent sous forme de flux d'énergie, mais qui diffèrent dans l'énergie finale obtenue. Ainsi, le potentiel raisonnablement mobilisable des différentes sources d'énergie renouvelables dépend de l'énergie finale nécessaire à la région et à l'époque considérées.

Les énergies renouvelables constituent une alternative aux systèmes énergétiques classiques, basés sur les ressources d'origine fossile ou fissile. D'un point de vue global, l'utilisation de sources d'énergie renouvelables permet de diminuer la dépendance énergétique du pays, de réduire le rejet des gaz à effet de serre, et de créer des emplois.

Cependant, la plupart des filières d'énergie renouvelables décrites ont besoin d'un soutien et d'un engagement politique et des institutions gouvernementales pour pouvoir se développer et atteindre une maturité économique

Annexe

Parameters	Valeurs
Courant de court circuit I_{cc} (A)	2.41
Tension de circuit ouvert V_{co} (V)	22.4
Puissance optimale P_{op} (A)	2.2
Section du module A_1 (m ²)	0.4
Coeff. De variation du courant en fonction de la température $\alpha.t$ (%/°C)	0.006
Coeff. De variation de la tension en fonction de la température $\beta.t$ (%/°C)	0.04

On note que ces valeurs sont données à une température $T=25^{\circ}\text{C}$ et un éclairement de

$$E=1000\text{W/m}^2$$

Bibliographies

- [1] **B. Achour**, "Simulation en régime transitoire d'un système De Pompage photovoltaïque", Faculté Des Sciences Et Des Sciences De L'ingénieur, Université de Biskra, 2005/ 2006
- [2] **N. Djemi**, "Electrification rural par voie solaire photovoltaïque", science de l'ingénieur, université de Biskra, 2006
- [3] [http : //fr .ekopedia.org/%C3%89energie_solaire](http://fr.ekopedia.org/%C3%89energie_solaire)
- [4] **A. Betka**, "Etude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque", Mémoire ingénieur, universitaire de Batna, 2006
- [5] **V. Michel**, "Centrales photovoltaïques : guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs", 1996
- [6] **L. Anne, V. Michel**, "Energie solaire photovoltaïque", DUNOD, Paris 2003
- [7] **T. Nacira**, "Optimisation des systèmes photovoltaïques connectes au réseau par la logique floue", mémoire de magister, université de Biskra, 2003/2004
- [8] **B. Achour**, "Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil soleil", mémoire de magister, C entre universitaire de Biskra, 1997
- [9] **C. Alonso**, "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie", mémoire, université Paul Sabatier-Toulouse III, 2003
- [10] **D. Kawthar**, "Optimisation des systèmes énergétiques solaires : capteurs thermiques plans", thèse de magister 2001
- [11] **p. Costerg, T. Meyer**, "L'électricité photovoltaïque", <http://www.total-energie.fr>
knologres.fr.st
- [12] **B. Poitevineau, R. Demez**, "L'Énergie solaire: maîtrise et performance photovoltaïques", <http://www.total.com/>, 2006
- [13] **Y. Pankow**, "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse tension, application au générateur", Doctorat de l'Ecole Nationale supérieure d'Arts et Métiers
- [14] **E. Michel, A. Deves**, "Energie photovoltaïque : application au traitement de l'eau potable des eaux usés en zones rurales", costic, Fndae n°12 document technique réédition 2003
- [15] **J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy**, "Le pompage photovoltaïque", Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens
- [16] <http://www.inti.be>

Bibliographies

- [17] **B. Déodat, D. Lucien, D. Adrien, G. Simon**, "Etudes des cellules photovoltaïques", Olympiades de la Physique 2004
- [18] **Bénédicte DENIS – Valérie PAREDES**, Mini-projet de machines thermiques L'énergie éolienne
- [19] www.systemes-solaires.com
- [20] **D. Madet** : "Hydraulique et géothermie : principes physiques et modalités d'utilisation" – Ecole d'été de physique – Caen – août-septembre 2001 (<http://e2phy.in2p3.fr>)
- [21] « Les Nouvelles Technologies de l'Énergie », **Hermès Publishing**, ISBN 2-7462-1376-1, 2006
- [22] **M. AURIOL** GEB-Environnement Rabat, Maroc.

Résume

L'objectif de ce mémoire est l'étude et l'analyse des différents formes d'énergie renouvelables existantes sur la planète, en discutant sa source et son potentiel énergétique et la technologie qui permet d'exploiter le maximum de potentiel énergétique pour la production d'énergie électrique. Sans oublier leurs impacts sur l'environnement.

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة وتحليل مختلف أشكال الطاقة المتجددة على سطح الكوكب، ومناقشة مصدرها والممكنة في مجال الطاقة والتكنولوجيا لاستغلال الطاقة القصوى الممكنة للطاقة الكهربائية. بما في ذلك آثارها البيئية