



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ ABOU-BAKR BELKAÏD DE TLEMCEM  
FACULTÉ DE SCIENCES

Département de Physique

Unité de recherches Matériaux et Energies Renouvelables

MEMOIRE De Magister

Spécialité : Physique Energétique et Matériaux

THEME

MODELISATION, SIMULATION ET OPTIMISATION D'UN  
SYSTEME HYBRIDE EOLIEN-PHOTOVOLTAIQUE

Présenté par : HASSINI née BELGHITRI HOUDA

SOUTENU EN 2010 devant la commission d'examen

Président	: N. BIBI TRIKI	MC	(U .A.B.Tlemcen)
Directeur de thèse	: B.BENYOUCEF	Professeur	(U .A.B.Tlemcen)
Examineur	: A. CHERMITI	MC	(U .A.B.Tlemcen)
	: A. KHERROUS	MC	(U .A.B.Tlemcen)
	: A .ZERGA	MC	(U .A.B.Tlemcen)

# *REMERCIEMENTS*

## **REMERCIEMENTS**

*Ce travail a été réalisé à l'unité de recherche de matériaux et des énergies renouvelables (URMER) du département de physique de la faculté des sciences de l'université Aboubakr Belkaid Tlemcen.*

*Avant tout, Je remercie notre Dieu le tout puissant de m'avoir donnée la force d'atteindre mon but et d'accomplir mon travail.*

*Que mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur Monsieur **B.BENYOUCEF**, professeur à l'université de Tlemcen et directeur de l'URMER, pour sa présence et son pragmatisme exemplaire qui a donné un véritable sens à notre travail.*

*Mes remerciements vont également à Mr. N **BIBI TRIKI** maître de conférences à l'université de Tlemcen, a bien voulu présider ce jury de thèse*

*Mes remerciements vont également à Mr. A **CKERMITI** maître de conférences à l'université de Tlemcen, Mr. A **KHERROUS** maître de conférences à l'université de Tlemcen, Mr. A **ZERGA** maître de conférences à l'université de Tlemcen, qui m'ont fait l'honneur de faire partie de ce jury.*

*Mes remerciements vont également à Mr. **S. Diaf** Centre de développement des énergies renouvelables Bouzareah Algérie, pour ces conseils scientifiques et de sa disponibilité sans limite*

*Mes remerciements vont également tous les personnes qui n'est pas citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail*

# *DEDICACES*

# *SOMMAIRE*

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre : 1 Généralité sur le système éolien –photovoltaïque</b> .....	4
<i>I-1</i> Généralité sur les systèmes éoliens .....	8
I-1-1 Introduction .....	8
I-1-2 Définition de l'énergie éolienne.....	9
I-1-3 Les différent types d'éoliennes : .....	10
I-1-4 Principe de fonctionnement .....	12
I-1-4-1 -Eléments constitutifs d'un aérogénérateur à axe horizontal .....	13
I-1-4-2 Caractéristiques technologiques des éoliennes .....	14
I-1-4-3 Bilan des forces sur une pale .....	16
I-1-5 Puissance fournit par un aérogénérateur .....	18
I-1-6 Régulation mécanique de la vitesse de l'éolienne .....	23
I-1-7 Critère de choix d'un potentiel éolien .....	24
I-1-7-1 Le vent.....	25
I-1-7-2 Gisement éolien en Algérie.....	25
I-1-7-3 La loi de distribution de weibull .....	28
I-1-7-4 La puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur :.....	31
<i>I-2</i> Généralité sur les systèmes photovoltaïque .....	32
I-2-1 Rayonnement solaire :.....	32
I-2-2 Le spectre de rayonnement solaire .....	33
I-2-3 La description des systèmes photovoltaïques .....	34
I-2-3-1 La cellule solaire :.....	34
I-2-3- 2 L'effet photovoltaïque .....	34

I-2-4	La technologies des cellules solaires .....	36
I-2-5	Le module photovoltaïque.....	37
I-2-5-1	Caractéristiques d'un module .....	37
I-2-6	Le panneau photovoltaïque.....	38
I-2-7	Repérage d'un site sur la surface terrestre.....	38
I-2-7-1	Coordonnées du soleil .....	39
I-2-7-2	Coordonnées du capteur.....	40
I-2-7-3	Angle d'incidence sur un capteur plan.....	41
I-2-8	Energie reçue par un capteur photovoltaïque .....	41
I-2-8-1	Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair) .....	41
I-2-8-2	Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert) .....	42
I-2-8-3	Estimation de l'énergie journalière incidente .....	43
I-2-8-4	Estimation de l'énergie annuelle incidente .....	43
I-2-9	Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	44
	Références bibliographiques	

## **Chapitre : 2 La modélisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque.....46**

II -1	La modélisation d'un système hybride éolien –photovoltaïque .....	49
II -2	La modélisation du champ photovoltaïque.....	50
II -2-1	La modélisation d'une cellule solaire :.....	50
II -2-3	paramètres caractéristiques d'une cellule solaire :.....	52
II -2-4	Facteur limitant le rendement :.....	54
II -2-5	Groupement des cellules solaires .....	56
II -2-6	Le Modèle de la puissance à l'entrée du champ photovoltaïque.....	59
II -2-7	Rendement photovoltaïque :.....	60

II -2-8 Le Modèle de la puissance à la sortie du champ photovoltaïque :.....	61
II -2-9 Simulation de l'énergie journalière .....	62
II -2-10 Simulation de l'énergie instantanée incidente.....	63
II -3 La modélisation d'une turbine éolienne .....	64
II -3-1 La puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur .....	64
II -3-2 Facteur de puissance.....	65
II -3-3 résultats et interprétation :.....	66
II -4 Modélisation de système de stockage :.....	70
II -4-1 Modèle de la charge de la batterie :.....	70
II -4-2 Modèle de la décharge de la batterie .....	71
II -4-3 La tension de la batterie :.....	71
II -5 Modélisation de l'onduleur.....	72

Références bibliographiques

**Chapitre : 3 simulations et optimisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque.....75**

III -1 Introduction :.....	76
III -2 Description de la méthode LPSP.....	76
III -3 Application dans un système hybride éolien- photovoltaïque .....	79
III -4 Résultats de la simulation :.....	80
III -5 Détermination du couple optimale (Npv, Nb) selon l'approche économique .....	81
III -6 Conclusion :.....	84

Références bibliographiques

**Conclusion générale .....**86

**Annexes.....**88

*INTRODUCTION  
GENERALE*

## INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Mais dans les pays industrialisés, dès le XIXème siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses.

Des récentes estimations ont montré qu'actuellement près de 2.2 milliards d'individus ne sont toujours pas raccordé aux grands réseaux d'électricité [1] (ce qui représente environ 44% de la population mondiale), pour la plus part située dans les pays du tiers monde dont l'Algérie, ou plus de 50% vivent encore sans électricité, 95% d'entre eux vivent dans la partie sud algérienne du fait des plus faibles revenus, de la présence des régions rudes et d'une faible densité de population.

La consommation d'énergie mondiale et dans notre pays ne cesse d'augmenter. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de l'énergie d'origine combustible. Certain pays, se sont tourné vers la nouvelle forme d'énergie dites « renouvelable » faisant appel de façon directe ou indirecte à l'énergie solaire .Parmi celle-ci l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays couvre certains de ses besoins en énergie solaire.

La production de l'électricité est donc forcément, malgré une apparence anodine, synonyme de perturbations. L'utilisation excessive d'un mode de production accentue fortement l'effet nuisible qui lui est associé et il apparaît évident que la diversification des sources est une solution à promouvoir.

L'utilisation de source d'énergie renouvelable induit le concept de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources. L'utilisation du stockage d'électricité est très diversifiée : les applications stationnaires connectées ou non au réseau. En particulier, les sites géographiquement isolés et non raccordés au réseau intégrant une source renouvelable.

Le rôle d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté.

Le générateur d'électricité d'origine hybride éolien – photovoltaïque avec un système de stockage est assuré par des batteries au plomb pour cela le dimensionnement de stockage optimale basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système et la charge de l'utilisation.

Le type de stockage généralement utilisé dans ce système est la batterie au plomb. La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût en sont les raisons principales.

Les systèmes hybrides (éolien – photovoltaïque) bien adaptés à une production décentralisée d'électricité peuvent contribuer à résoudre ce problème.

Le générateur d'électricité d'origine renouvelable sélectionné pour notre étude est le système hybride éolien – photovoltaïque.

L'intérêt de ce travail est de maintenir un niveau de fiabilité avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal de système hybride éolien – photovoltaïque pour cette raison on présente

une méthode de dimensionnement optimale d'un système hybride de production d'électricité avec un niveau de fiabilité fixé.

Pour cela

En premier chapitre, on fait une description générale, et le principe de fonctionnement de système éolien et photovoltaïque.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de chaque éléments constitue le système hybride éolien –photovoltaïque

Le troisième chapitre est consacré à la simulation et optimisation de système hybride éolien – photovoltaïque par la méthode de probabilité de perte d'énergie (LPSP), pour le site de Tlemcen.

Nous terminerons ce modeste travail par quelque par une conclusion générale qui résume notre étude .

# *CHAPITRE 1*

## *Généralité sur le système éolien - photovoltaïque*

## *NOMENCLATURE*

$dr$  : largeur de la pale (m)

$l$  : la longueur de corde (m)

$F_t$  : La poussée axiale (N)

$F_a$  : La poussée de rotation (N)

$d\vec{F}$  : La résultante des forces (N)

$l(r)$  : longueur de la corde à la distance  $r$  de l'axe de rotation (m)

$C_L$  : coefficient de portance (.)

$C_D$  : coefficient de traînée (.)

$C_z$  : coefficient de portance suivant le plan de rotation (.)

$C_x$  : coefficient de poussée (.)

$W$  : module du vent apparent

$L$  : La force de portance (N)

$D$  : La force de traînée (N)

$F_t$  : La poussée axiale (N)

$F_a$  : La poussée de rotation (N)

$M$  : masse d'air (Kg)

$V$  : la vitesse de vent ( $\text{ms}^{-1}$ )

$\rho$  : densité d'air ( $\text{Kg/m}^3$ )

$V_1$  : la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur ( $\text{ms}^{-1}$ )

$V_2$  : la vitesse en aval l'aérogénérateur. ( $\text{ms}^{-1}$ )

- A : la surface ( $M^2$ )
- Cp : coefficient de puissance (.)
- $P_{\text{réc}}$  : puissance récupérable (Watt)
- $\Omega$  : Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne (rad/s)
- Vd : la vitesse de démarrage ( $ms^{-1}$ )
- Vn : la vitesse nominale ( $ms^{-1}$ )
- Vm : la vitesse d'arrêt de la machine ( $ms^{-1}$ )
- $\Gamma$  : est la fonction Gamma (.)
- Z1 : hauteur de référence égale à 10 m a.d.s (m)
- Z2 : hauteur désirée a.d.s (m)
- Z0 : paramètre de rugosité du sol égale 0.01m (m)
- k : le facteur de forme
- C : est le facteur d'échelle (m/s)
- C1 : paramètre d'échelle à 10m a.d.s (m/s)
- a.d.s : **au dessus** du sol.
- k1 : paramètre de forme à 10m a.d.s
- P(V) : Fonction de puissance de l'aérogénérateur (W)
- $f(V)$  : Fonction de distribution de la vitesse du vent (.)
- $\langle P \rangle_{\text{moy}}$  : La densité de puissance moyenne annuelle récupérable ( $W/m^2$ )
- $\lambda_m$  : Longueur d'onde
- Vco : Tension à vide (V)
- Icc : Courant de court circuit (A)
- $\varphi$  : La latitude du lieu ( $^\circ$ )
- $\lambda$  : La longitude du lieu ( $^\circ$ )
- $\delta$  : La déclinaison du soleil ( $^\circ$ )
- H : L'angle horaire du soleil ( $^\circ$ )
- h : La hauteur du soleil ( $^\circ$ )
- a :Azimut du soleil ( $^\circ$ )

$\gamma$  : La hauteur de la normale du capteur ( $^{\circ}$ )

$\alpha$  : Azimut du capteur ( $^{\circ}$ )

$i$  : l'angle d'incidence ( $^{\circ}$ )

$E_S$  : rayonnement direct (Wh)

$E_D$  : rayonnement diffus (Wh)

$E_G$  : rayonnement global (Wh)

$\beta$  : L'inclinaison du capteur ( $^{\circ}$ )

$a^*$  : l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol (.))

## Chapitre 1

### Généralité sur le système éolien –photovoltaïque

#### I-1 Généralité sur les systèmes éoliens :

##### Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer.

C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal)

L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, provient du déplacement des masse d'air qui est du indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autre une différence de pression est crée et la masse d'air est en perpétuel déplacement. Environ 0,25% du rayonnement solaire total est converti en énergie éolienne. [1]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée).

L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité. Elle est en plein développement en terme de puissance installée dans le monde .Plusieurs facteurs ont contribué et contribuent encore à son essor :

- L'énergie éolienne est propre : les éoliennes n'engendrent aucune pollution. Elle ne rejette aucune substance dangereuse dans l'environnement et n'engendre aucun déchet. L'utilisation d'une turbine de 1000 kW, dans des conditions normales, évite un rejet annuel de 2000 tonnes de dioxyde de carbone émis par d'autres sources de production d'électricité, comme par exemple les centrales électriques à charbon.
- L'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable, Il constitue donc une véritable ressource renouvelable.

- L'énergie éolienne est prometteuse : l'énergie éolienne est actuellement la moins chère de toutes les énergies renouvelables existantes. Une étude faite en 2003 sur l'état de l'art de l'éolien montre que le coût à cette époque du kilowattheure (kWh) d'origine éolien était de 3.79 cent € [1]. Le développement de l'éolien permettra de réduire encore ce coût. Si les objectifs sont atteints, le prix diminuerait à 3.03 cent €/kWh en 2010, et à 2.45 cent €/kWh en 2020. [2]

-L'énergie éolienne est la source d'énergie renouvelable la plus fiable : une éolienne a un taux de disponibilité matérielle de plus de 98%.

Le Tableau 0-1 présente l'évolution durant les dernières années de la puissance éolienne installée dans les principaux pays. [2]

Pays	2000 (MW)	2002 (MW)	2004 (MW)
Allemagne	5430	12001	16629
USA	2550	4708	6740
Espagne	2250	4144	8263
Danemark	2140	2889	3117
Inde	1167	1702	3000
Italie	350	785	1125
Pays-Bas	449	677	1078
Grande-Bretagne	391	562	888
Chine	302	399	764
<b>France</b>	<b>69</b>	<b>153</b>	<b>416</b>

***TABLEAU 1-1 : puissance installée d'origine éolienne dans les principaux pays [2]***

### **I-1-1 Définition de l'énergie éolienne**

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables.

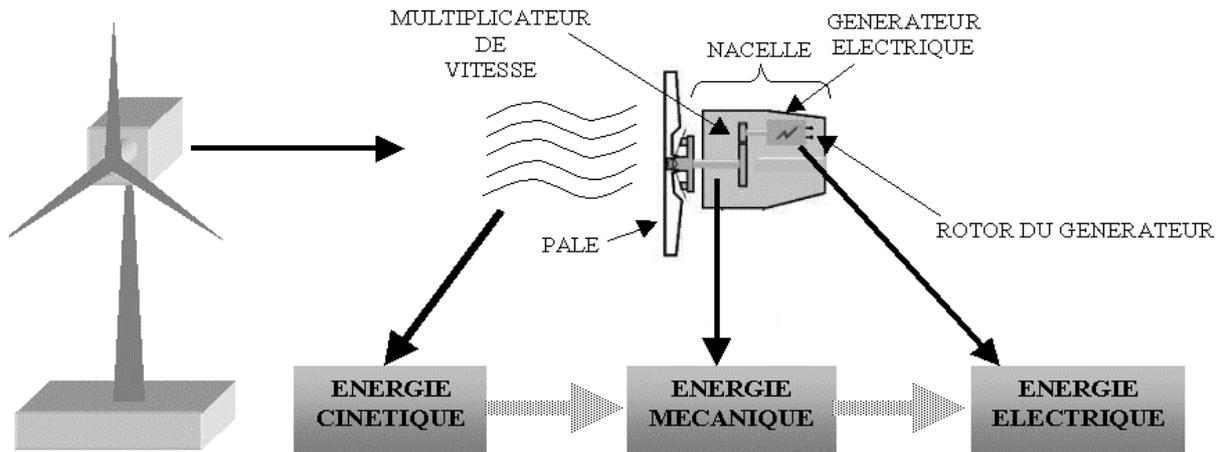


Figure 1-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

## I-1-2 Les différent types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal [3]:

### a) Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau.
- Elles ont un rendement élevé.
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple .

Sur base la du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes:

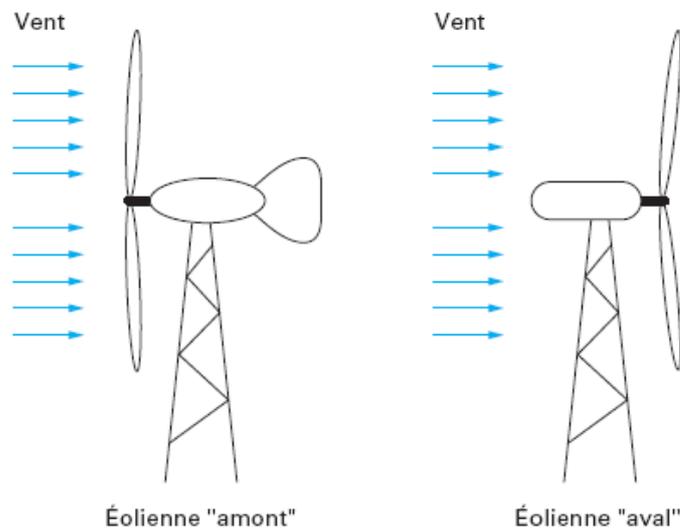
#### 🚧 -les éoliennes à rotation lente "multipales"

Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi-exclusivement au pompage de l'eau.

## ✚ - Aérogénérateurs

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant "d'aérogénérateurs".

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « *hélice au vent* » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « *hélice sous le vent* ».



**Fig1-2 : configuration à axe horizontal [3]**

### b) Les éoliennes à axe vertical [3]

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles.

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

- ❖ L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer
  - Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s
- ❖ L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet.



*Éolienne de type Darrieus.*



*Éolienne de type Savonius.*

*Fig1-3 : éolienne de type Darrieus et Savonius [3]*

### **I-1-3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :**

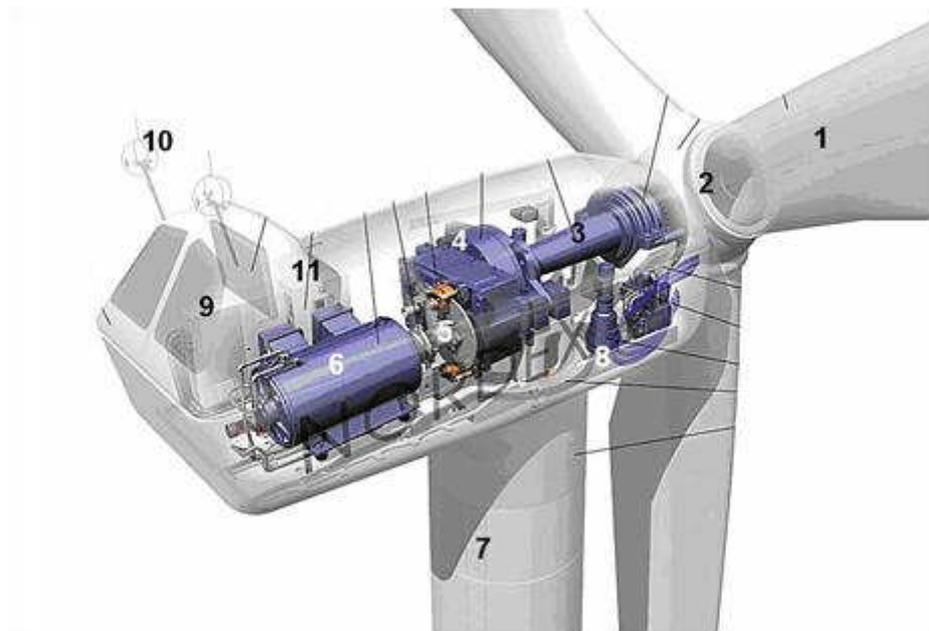
Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes:

- ❖ Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.

- ❖ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. [4]

### I-1-3-1 ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D'UN AÉROGÉNÉRATEUR (A AXE HORIZONTAL) [5]

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées.



*Fig1-4 : les composante de l'aérogénérateur*

- 1. Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor
- 2. Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- 3. L'arbre primaire** (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.
- 4. Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.

5. **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
8. **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
9. **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
10. **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
11. **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
12. Au pied du mât se trouve un **transformateur**.

## I-1-3-2 Caractéristiques technologiques des éoliennes

### 1 Le supportage

Les pylônes peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils peuvent être autoporteurs et auto résistants ou haubanés. Si l'haubanage permet de réduire les dimensions du mât, par contre il pénalise l'emprise au sol. Pour limiter l'occupation au sol, le supportage de plusieurs éoliennes par une seule structure est envisagée ; dans ce cas, les pylônes constitués de structures métalliques en treillis sont intéressants. Actuellement les mats en caisson, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de forte puissance.

[6]

## 2 Les pales [7]

Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien.

Plusieurs éléments caractérisent ces pales :

- la longueur
- la largeur
- le profil
- les matériaux
- le nombre

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tel que : coûts, résistance au climat ...

### Longueur

-Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

### Largeur

-La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

### Le profil

Il est choisi en fonction du couple désiré.

Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance ( $\geq 100$  kW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice.

Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

## Les matériaux

-Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, particulièrement ceux dus aux pales d'hélicoptère.

Contrairement à ce que l'on croit fréquemment, ce n'est pas dans le domaine de l'aérodynamique que réside la difficulté mais bien dans celui de la construction et de la résistance des matériaux. En effet, c'est dans le mode de réalisation des pales qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche.

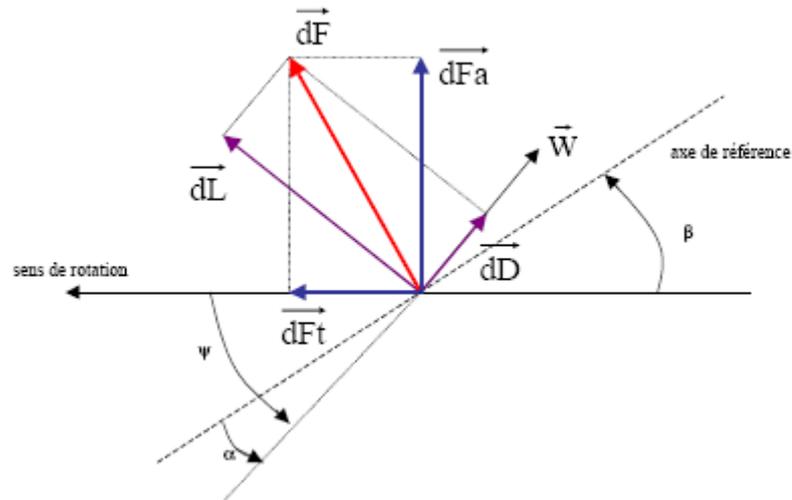
Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en oeuvre ou d'usinage simple.

On rencontre plusieurs types de matériaux :

- **le bois** : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.
- **le lamellé-collé** : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.
- **les alliages d'aluminium** : pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.
- **les matériaux composites** : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

### **I-1-3-3 Bilan des forces sur une pale**

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur la section de pale de largeur  $dr$  et de longueur de corde  $l$  une distance  $r$  de l'axe de rotation une force résultante  $d\vec{F}$



**Fig1-5 : Forces appliquées sur un élément de pale [2]**

On peut décomposer la force résultante  $d\vec{F}$  de la manière suivante :

- ❖ la portance  $d\vec{L}$  , normale à la direction du vent apparent.
- ❖ La force de  $d\vec{D}$  , parallèle à la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

La pousse axiale  $d\vec{F}_a$  , perpendiculaire au plan de rotation.

La pousse tangentielle  $d\vec{F}_t$  , dans la direction de rotation

Les modules des forces  $dD, dL$  s'expriment en fonction de deux coefficient, le coefficient de portance  $C_L$  et le coefficient de traînée  $C_D$

La force de portance : 
$$L = \frac{1}{2} \rho w^2 dA C_L \quad (1-1)$$

La force de traînée : 
$$D = \frac{1}{2} \rho w^2 dA C_D \quad (1-2)$$

La poussée axiale : 
$$F_t = \frac{1}{2} C_z \rho W^2 S \quad (1-3)$$

La poussée de rotation: 
$$F_a = \frac{1}{2} C_x \rho W^2 S \quad (1-4)$$

Avec

$dA = l(r) \cdot dr$  : surface du tronçon de pale

$l(r)$  : longueur de la corde à la distance  $r$  de l'axe de rotation

$C_L$  : coefficient de portance (sans dimension)

$C_D$  : coefficient de traînée (sans dimension)

$C_z$  : coefficient de portance suivant le plan de rotation

$C_x$  : coefficient de poussée

$W$  : module du vent apparent

Ces coefficients  $C_L$  et  $C_D$  dépendent du profil de la pale et de l'angle d'incidence  $\alpha$ . Dans l'analyse du fonctionnement des turbines éoliennes on utilise le diagramme du rapport  $C_x/C_z$  en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha$ . Ce rapport reflète le rendement de conversion de l'énergie éolienne

#### I-1-4 PUISSANCE FOURNIE PAR UN AEROGENERATEUR

A) Potentiel éolien disponible :

L'énergie cinétique d'une masse d'air  $m$  qui se déplace avec la vitesse  $V$ , est:

$$EC = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1-5)$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface  $A$  ( $A = \pi R^2$ ), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent

Le potentiel éolien moyen disponible sur un site est donnée par:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1-6)$$

$\rho$ :densité d'aire

$$P_{disp} = 1/2 \rho A v^3 \quad (1-7)$$

### B) La puissance moyenne récupérable [8]

En réalité, le dispositif de conversion (turbine éolienne) extrait une puissance  $P_{rec}$  inférieure à la puissance disponible  $P_{disp}$  :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (1-3) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$ .

Soit  $(V_1 + V_2) / 2$  est la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est :

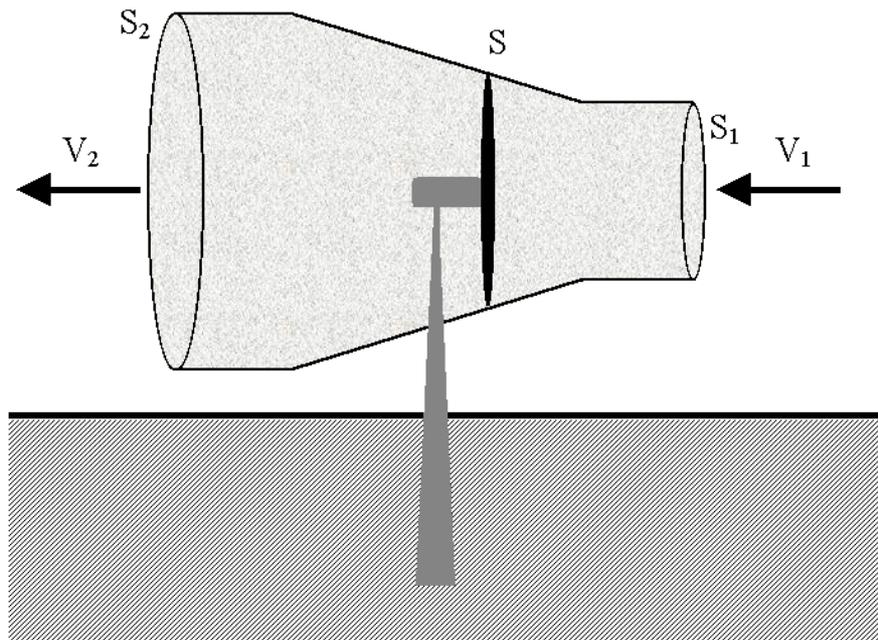
$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (1-8)$$

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1-9)$$

Soit en remplaceront  $m$  par son expression dans (1-8)

$$P_m = \frac{\rho V (V_1 - V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1-10)$$



**Fig1-6 : tube de courant autour d'une éolienne [8]**

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse ,soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1-11)$$

La ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est

alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1-12)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (*Fig1-7*), on s'aperçoit que le ratio  $P_m/P_{mt}$  appelé aussi coefficient  $C_p$  présente un maxima de  $16/27$  soit  $0.59$  .c'est cette limite théorique appelée limite de betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

$$P_{\text{réc}} = \frac{1}{2} C_P \rho A V^3 \quad (1-13)$$

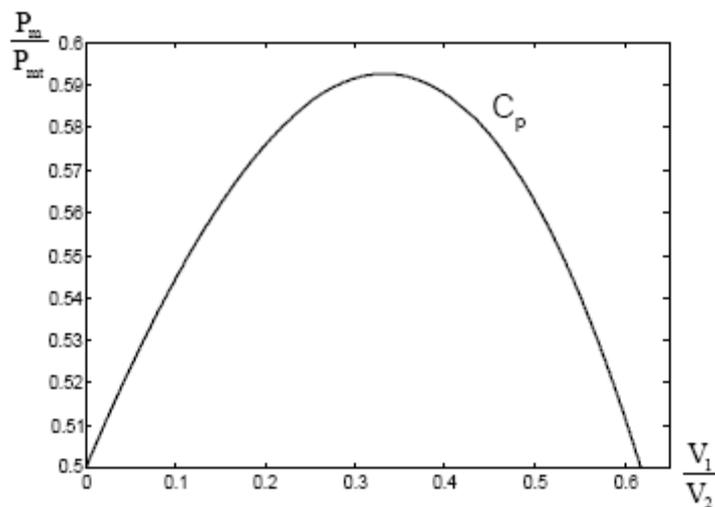
En prend en considération la limite de betz et en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne, la moyenne maximale récupérable par unité de surface est donnée par [9] :

$$P_{\text{réc}} = 0.37 V^3 \quad (1-14)$$

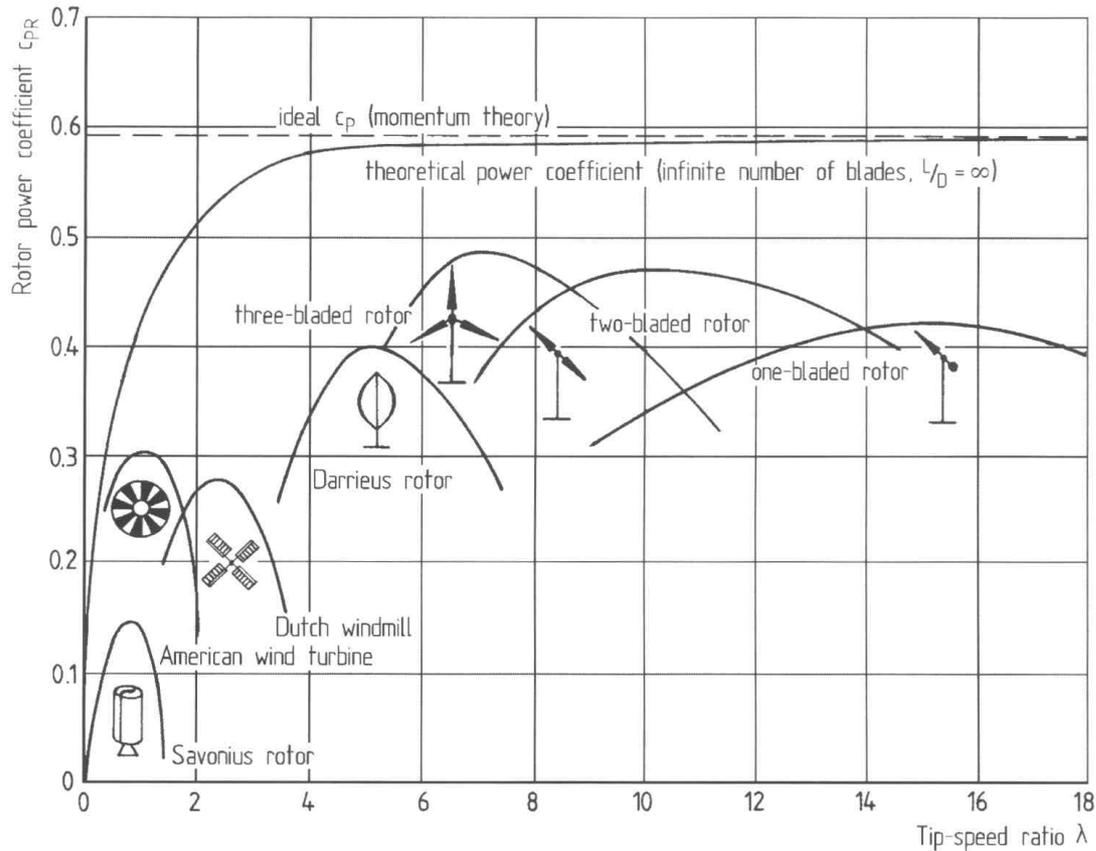
Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (1-15)$$

$\Omega$  : Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne



**Fig1-7 : Coefficient de puissance**



**Fig1-8 : coefficient de puissance en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$  pour différents types de turbines**

Des courbes typiques pour différents aérogénérateurs sont pressentes sur la figure (1-8) .En générale dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse normalisée, atteignant un maximum pour une certaine valeur de  $\lambda$  puis diminue même avec l'augmentation de la vitesse normalisée.

Ces variation de  $C_p (\lambda)$ , dépendant de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs élément dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pales utilisées

Nous définissons le couple sur l'arbre T de la manière suivante

$$T = \frac{P}{\Omega} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} \rho \pi R^3 V^2 \quad (1-16)$$

Le coefficient de couple  $C_T$  relié au coefficient de puissance par la relation suivant

$$C_p(\lambda) = \lambda C_T(\lambda) \quad (1-17)$$

Le coefficient  $C_T$  est, comme le coefficient  $C_p$ , fonction de la vitesse du vent et de la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne  $\Omega$  [10]

## I-1-5 REGULATION MECANIQUE DE LA VITESSE DE L'EOLIENNE

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale  $P_n$  à partir d'une vitesse de vent nominale  $V_n$ . Pour des vitesses de vents supérieures à  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que sa vitesse de rotation reste constante [11]

D'après l'équation (1-9), on peut voir que la puissance produite est indéfiniment croissante en fonction de la vitesse du vent, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Les dispositifs de sécurité de la machine éolienne font en sorte à avoir l'expression de la puissance répartie sur différentes gammes de vitesses du vent .

Où

$V_d$  : est la vitesse de démarrage, à partir de la quelle l'éolien commence à fournir de l'énergie

$V_n$  : la vitesse nominale,

$V_m$  : la vitesse d'arrêt de la machine pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour les raisons de sûreté de fonctionnement

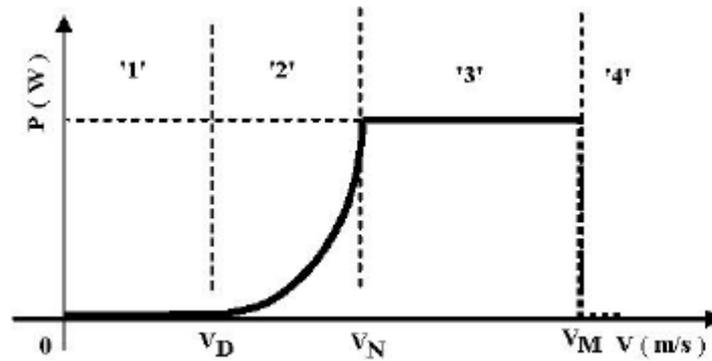
Les vitesses  $V_n$ ,  $V_d$  et  $V_m$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent : [11]

- **la zone 1** : où  $P = 0$  (la turbine ne fonctionne pas),

- **La zone 2** : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $V_w$  ;

- **la zone3** : où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance  $P_{turbine}$  fournie reste sensiblement égale à  $P_n$  ;

- **la zone 4** : dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.



**Fig1-9 : Diagramme de la puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent**

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice : [10]

1. système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses.
2. système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales).

D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités :

- basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal ;
- pas variable par la pression du vent (modèle Airwind : les pales en fibre, se déforment et provoquent un décrochage) ;
- déviation par rapport à l'axe du vent. La dérive se trouve légèrement décalée par rapport à l'axe de rotation vertical (qui permet normalement à la turbine d'être face au vent) et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique (la turbine reçoit un vent de travers).

### **I-1-6 Critère de choix d'un potentiel éolien :**

L'énergie cinétique de vent constitue une ressource énergétique inépuisable mais fluctuante. Pour toute installation d'une éolienne dans un endroit, il faut d'abord faire une étude des caractéristiques des sites :

Quantifier la ressource éolienne sur les sites d'application.

Estimer la puissance moyenne annuelle disponible sur ces sites.

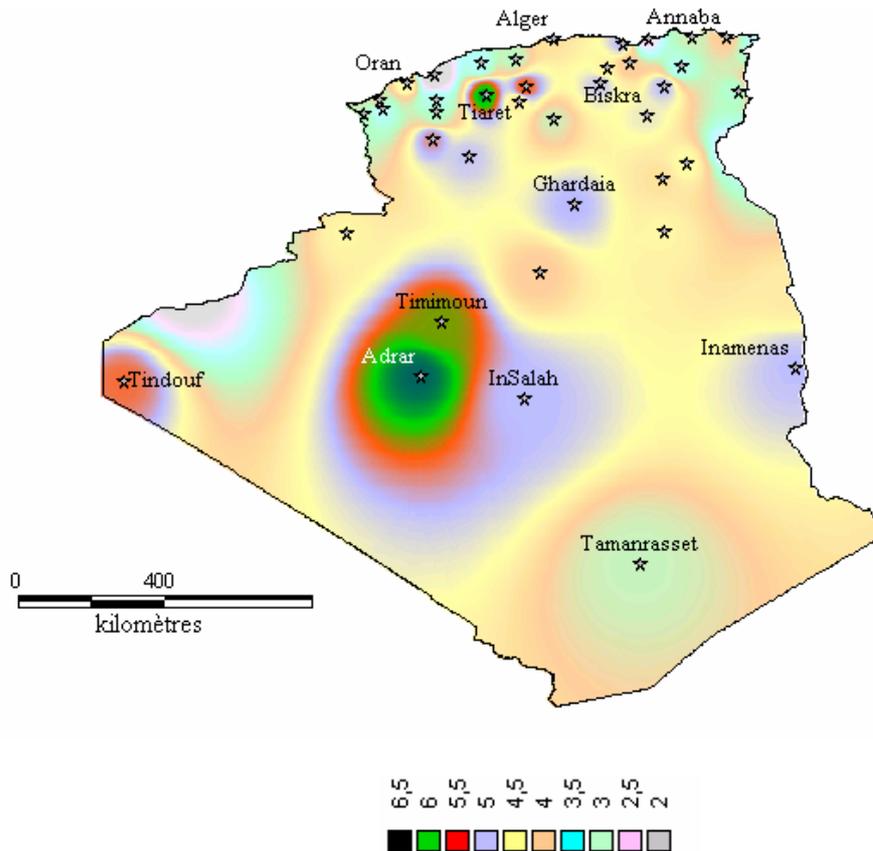
**I-1-6-1 Le vent :**

Le vent est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère (mouvement d'air). Les mouvements de direction verticale sont appelés des courants. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température. Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par dessus l'air le plus froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la terre [12]

**I-1-6-2 Gisement éolien en Algérie :**

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grands zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas télien et l'atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers de Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud [13]

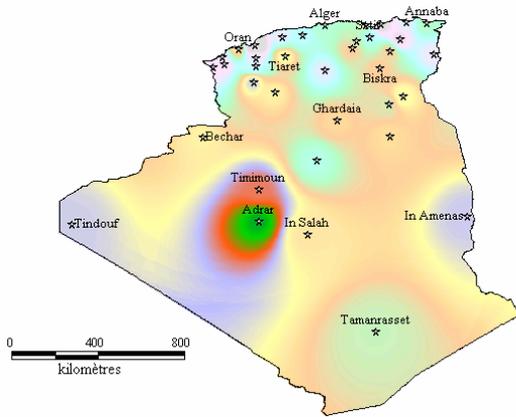


*Figure1-10 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.*

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

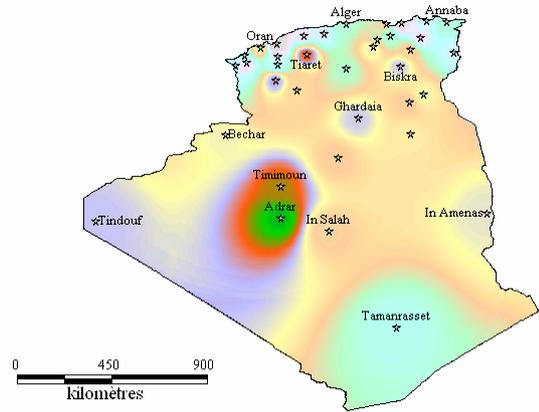
En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont Représentés en figures 1-10 (Eté et Printemps, Hiver et Automne). On Remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le Reste de l'année

**Eté**



0 400 800  
kilomètres

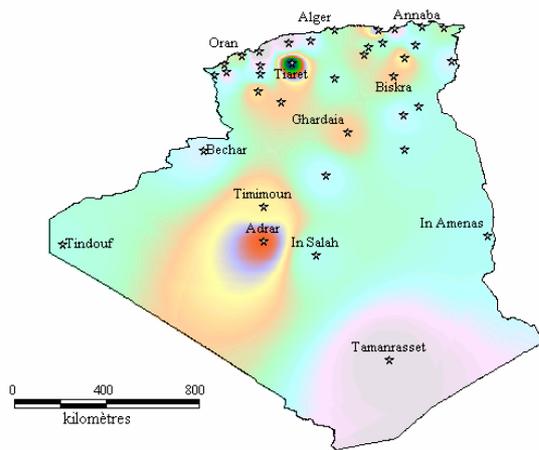
**Printemps**



0 450 900  
kilomètres

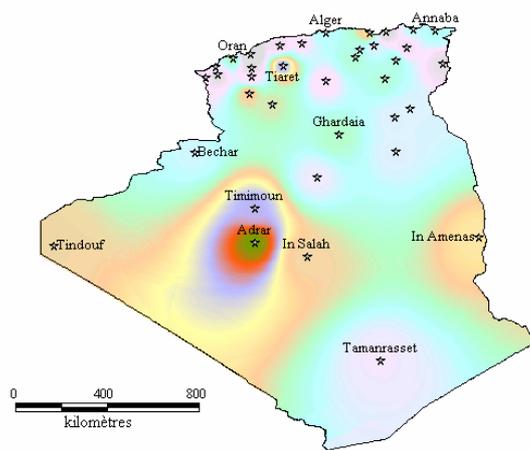


**Hivers**

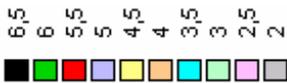


0 400 800  
kilomètres

**Automne**



0 400 800  
kilomètres



**Fig1-11 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne, Eté et Printemps) [9]**

**I-1-6-3** La loi de distribution de weibull :

La connaissance de la loi de distribution de la vitesse du vent est importante pour de nombreuses applications de l'énergie éolienne. [14-15-9]

Divers modèle de distribution statistique, notamment le modèle log-normal, la distribution gaussienne bivariante ont été appliqués pour caractériser la distribution de probabilité de la vitesse moyenne du vent. Toutefois, le modèle le plus utilisé est celui de la distribution de weibull qui s'avère approprié à la représentation des propriétés statistiques du vent (Keller, 1992) [14]

La distribution de weibull est cas particulier de la loi de distribution gamma généralisée, elle peut être réduite en deux autres distribution théoriques : la distribution exponentielle (k=1) et la distribution rayleigh(k=2)

La forme mathématique de la distribution de weibull est :

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right] \quad (1-18)$$

C : paramètre d'échelle

K : paramètre de forme

La fréquence cumulée ou probabilité pour que la vitesse du vent soit inférieure à un certain seuil donné  $V_x$  est donnée par :

$$f(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right] \quad (1-19)$$

De la même façon, la probabilité pour que la vitesse du vent soit supérieure à cette valeur  $V_x$  est donnée par :

$$f(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left[-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right] \quad (1-20)$$

La probabilité pour que la vitesse  $V$  soit comprise entre deux valeurs  $V_x$  et  $V_y$  est donnée par :

$$f(V_x \leq V \leq V_y) = \int_{V_x}^{V_y} f(V) dV = \exp\left[-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_y}{C}\right)^k\right] \quad (1-21)$$

La vitesse moyenne du vent est donnée par la distribution de Weibull :

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} f(V) dV = C \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (1-22)$$

Où  $\Gamma$  est la fonction Gamma. La fonction Gamma est définie par la relation suivante :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt \quad \text{Avec } x > 0 \quad (1-23)$$

L'écart type de la distribution est donné par :

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (V - \bar{V})^2 P(V) dV = C^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \quad (1-24)$$

La moyenne du cube de la vitesse du vent est donnée par :

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 P(V) dV = C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (1-25)$$

Les rapports  $\frac{\bar{V}}{C}$ ,  $\frac{\sigma}{\bar{V}}$ , le coefficient d'irrégularité  $\frac{\langle V^3 \rangle}{\bar{V}^3}$  et le rapport  $\frac{V_m}{\bar{V}}$ , qui dépendent seulement de  $k$

$$\frac{\bar{V}}{C} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (1-26)$$

$$\frac{\sigma}{\bar{V}} = \left[ \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-27)$$

$$\frac{\langle V^3 \rangle}{\bar{V}^3} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (1-28)$$

$$\frac{V_m}{\bar{V}} = \frac{(Ln2)^{\frac{1}{k}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (1-29)$$

$V_m$  : la vitesse médiane

On détermine la caractéristique du vent à une hauteur quelconque du rotor, en utilisant la méthode de Justus[15] :

$$C_2 = C_1 \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^{\alpha k} \quad (1-31)$$

Ou :

$$\alpha k = \frac{1}{Ln\left(\frac{\sqrt{Z_1 Z_2}}{Z_0}\right)} - 0.0881 Ln\left(\frac{C_1}{6}\right) \quad (1-32)$$

Avec :

$Z_1$  : hauteur de référence égale à 10 m a.d.s[m]

$Z_2$  : hauteur désirée a.d.s[m]

$Z_0$  : paramètre de rugosité du sol égale 0.01m[m]

C1 : paramètre d'échelle à 10m a.d.s [m/s] (a.d.s : **au dessus** du sol.)

Pour le facteur de forme  $k$  :

$$k_2 = \frac{k_1}{1 - 0.088Ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)} \quad (1-33)$$

Avec

$k_1$  : paramètre de forme à 10m a.d.s

La densité de puissance moyenne annuelle récupérable  $\langle P \rangle_{moy}$  exprimée en kWh/m<sup>2</sup>.on se calcule à partir de la formule suivante : [16]

$$\langle P \rangle_{moy} = T(Pi) \quad (1-34)$$

Avec

$$Pi = 0.37\langle Vi^3 \rangle \quad (1-35)$$

Ou T : l'échelle de temps à une année  $T = 365.24 = 8760$  heures/an

Enfin la densité de puissance moyenne annuelle récupérable est :

$$\langle P \rangle_{moy} = 32.5\langle Vi^3 \rangle \quad (1-36)$$

#### **I-1-6-4** La puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur :

La puissance moyenne produite par un aérogénérateur peut être évaluée en combinant sa courbe de puissance avec la distribution de la vitesse du vent sélectionnée .Elle est donnée par

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(V)f(V)dV \quad (1-37)$$

P (V) : Fonction de puissance de l'aérogénérateur.

$f(V)$  : Fonction de distribution de la vitesse du vent.

## **I-2 Généralité sur les systèmes photovoltaïque :**

### **Introduction**

Dans la plupart des pays en voies de développement, rendre l'électricité disponible dans le milieu rural a toujours été un enjeu socio-économique important. Ce problème d'accès à l'électricité est incompatible avec un développement équilibré de ces pays et constitue un des facteurs favorisant l'exode rural. C'est donc un défi de mettre à la disposition des populations rurales une source d'énergie capable de stimuler l'activité économique et de conduire à une amélioration de leurs conditions de vie.

Aussi, il est nécessaire d'explorer de nouvelles solutions possibles pour assurer une électrification rationnelle du monde rural, par exemple l'exploitation du potentiel solaire abondant dont disposent ces pays.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en oeuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente.

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit donc être correctement dimensionné. Ce qui exige une étude assez rigoureuse dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût. Mais les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système PV.

### **I-2-1 Rayonnement solaire :**

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments [17], c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de

degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière, à une vitesse de 300000Km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ  $0.5 \mu\text{m}$ , la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ  $5780^\circ\text{K}$  [18].

### I-2-2 Le spectre de rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire s'est rayonnement électromagnétique décomposé de grains de lumière appelés photons .L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde dont 98% d'énergie est comprise entre  $\lambda = 0.25 \mu\text{m}$  et  $\lambda = 4 \mu\text{m}$  le reste représente 1% au-dessus et 1% au –dessous de cet intervalle.

Le spectre de rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à  $5800^\circ\text{K}$ . [17]

La répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde est [34] :

Pour  $0.25 \mu\text{m} < \lambda < 0.4 \mu\text{m}$  : c'est le domaine de l'ultraviolet (invisible), il représente 7% de l'énergie totale émise par le soleil.

Pour  $0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.8 \mu\text{m}$  : c'est le domaine du visible, il représente 47.5% de l'énergie totale émise par le soleil.

Pour  $0.8 \mu\text{m} < \lambda < 4 \mu\text{m}$  : c'est le domaine de l'infrarouge (invisible), il représente 45.5% de l'énergie totale émise par le soleil.

L'énergie rayonnée par le soleil n'est pas uniformément répartie pour toutes les longueurs d'onde, elle passe par un maximum pour une longueur d'onde donnée par la loi de WIEN :

$$\lambda_m T = 2898 \mu_m K \quad (1-38)$$

Pour  $T=2800\text{K} \Rightarrow \lambda_m \approx 0.5 \mu_m$

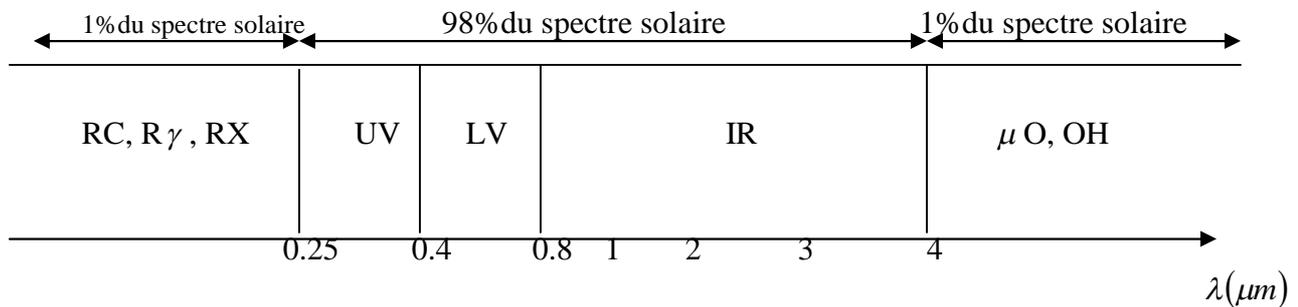
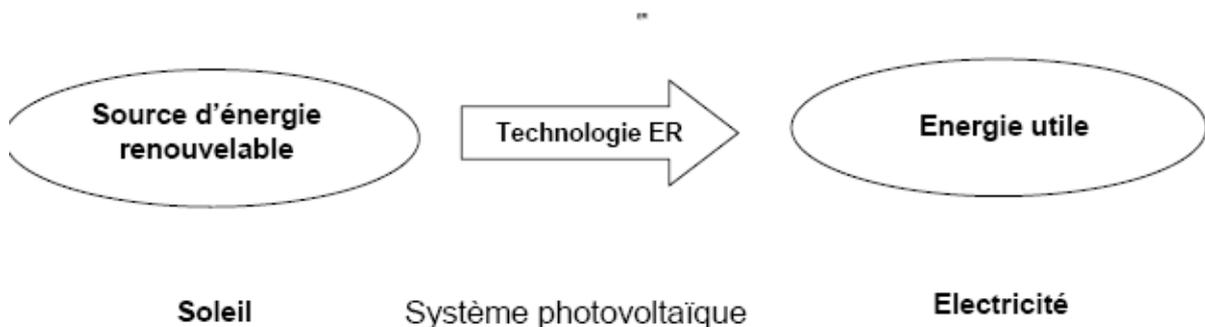


Fig1-12 : spectre du rayonnement solaire

## I-2-3 La description des systèmes photovoltaïques :

### I-2-3-1 La cellule solaire :

La cellule solaire est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par un processus appelé **EFFET PHOTOVOLTAÏQUE**.



### I-2-3-2 L'effet photovoltaïque :

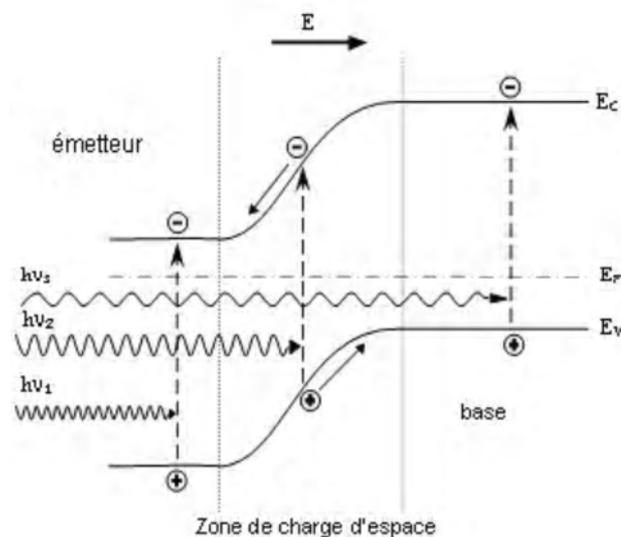
L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par A. Becquerel en 1839. Il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium. [19]

Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ( $h\nu$ ), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ( $E_g = E_c - E_v$ ), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction.

Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires.

Si les photons ont une énergie très supérieure à  $E_g$ , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. l'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

Si les photons ont une énergie inférieure à  $E_g$  ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. [29]



**Fig1-13 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction**

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones de n et p et dans la zone de charge d'espace. les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région :

Dans la zone n ou p les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires on aura un photocourant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace, les paires électron /trous créés par les photons incident sont dissociés par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. on aura un photocourant de génération .

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo courant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteur minoritaire il est proportionnel à l'intensité lumineuse. [19]

#### **I-2-4 La technologies des cellules solaires : [24]**

Les technologies des cellules solaires se divisent en deux grandes familles :

##### **A) La cellule cristalline** (qu'il soit mono ou poly) :

Est une technologie éprouvée et robuste (espérance de vie : 30 ans), dont le rendement est de l'ordre de 13 %. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Elles représentent près de 80 % de la production mondiale en 2000.

##### **La cellule monocristalline :**

Sont des cellules qui s'approche le plus du modèle théorique, elles sont effectivement composées d'un seul cristal divisé en deux couches.

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie, plus onéreux, il est cependant plus efficace que la cellule poly-cristalline

##### **La cellule poly-cristalline :**

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées : elles représentent 49 % de l'ensemble de la production mondiale en 2000. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication, leurs rendements sont de 13% jusqu'à 20% en labo

##### **B) La cellule amorphe :**

Les coûts de fabrication sont sensiblement meilleurs que ceux du silicium cristallin. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée, ou, quand très peu d'électricité est nécessaire (par exemple, alimentation des montres, calculatrices, luminaires de secours). Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, le rendement est de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même

puissance installée. Les cellules en silicium amorphe sont actuellement de moins en moins utilisées : 9,5 % de la production mondiale en 2000, alors qu'elles représentaient 12 % en 1999.

D'autres techniques semblent gagner du terrain aujourd'hui, ce sont les technologies en ruban et les couches minces.

### **I-2-5 LE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE :**

Les puissances demandées par les charges couramment utilisées nécessitent conjointement des tensions supérieures à ceux que peuvent fournir les cellules élémentaires, il faut donc envisager des groupements. Pour cela les cellules sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la même tension.

Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique. [22-30]

#### **I-2-5-1 Caractéristiques d'un module : [27]**

Voici la description des paramètres d'un module :

**La puissance crête  $P_C$**  : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standard (25°C et un éclairement de 1000W/m<sup>2</sup>).

**La caractéristique I (V)** : courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci .

**Tension à vide  $V_{co}$**  : tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».

**Courant de court circuit  $I_{cc}$**  : courant débité par un module en court circuit pour un éclairement « plein soleil ».

**Point de fonctionnement optimum ( $U_m, I_m$ )** : lorsque la puissance de crête est maximum en « plein soleil »,  $P_m = U_m \cdot I_m$  .

**Rendement maximal** : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

**Facteur de forme** : rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance de radiation incidente.

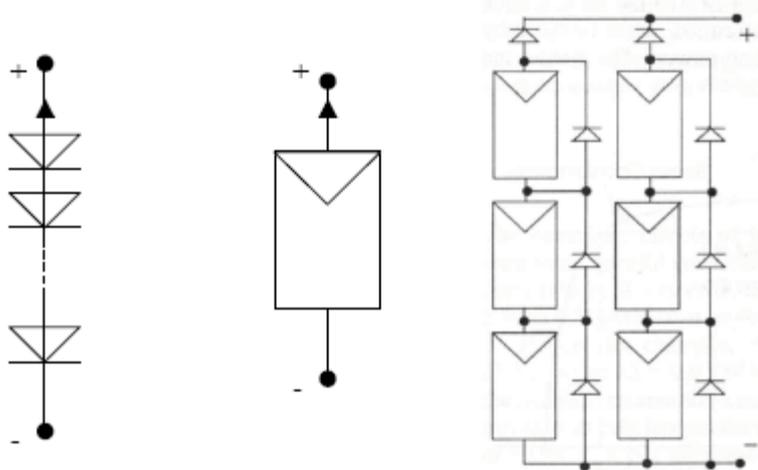
**Facteur de forme** : rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ .

### I-2-6 LE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE : [21]

Afin d'obtenir des puissance de quelques KW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associe les modules en série (augmenté la tension) et en parallèle (augmenté le courant) pour former un panneau (ou champ PV).

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend :

- ✓ Des besoins en électricité
- ✓ De la taille du panneau
- ✓ De l'ensoleillement du lieu d'utilisateur
- ✓ De la saison d'utilisateur



**Fig1-14 :** Cellule, module et panneau photovoltaïque

### I-2-7 Repérage d'un site sur la surface terrestre [20] :

Pour repérer un site donné  $S$  sur la surface terrestre on définit deux grandeurs :

- ❖ **la latitude du lieu**  $\varphi$  qui représente la distance angulaire du site  $S$  par rapport au plan de l'équateur  $\varphi$  varie entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$  tel que [ $\varphi > 0$  vers le Nord et  $\varphi < 0$  vers le Sud].
- ❖ **la longitude du lieu**  $\lambda$  c'est l'angle que fait le méridien de Greenwich avec la projection du méridien de lieu sur le plan équatorial.

Pour Tlemcen  $\lambda = -1,19^\circ$  et  $\varphi = 34,56^\circ$

### I-2-7-1 Coordonnées du soleil :

Pour bien définir les coordonnées du soleil, il convient de spécifier un certain nombre de direction de référence, ou elle varie à chaque instant de la journée de deux manières, par deux systèmes de coordonnées différents : [22]

#### ✚ Par rapport au plan équatorial de la terre :

##### La déclinaison du soleil $\delta$ :

La direction du soleil est repérée par rapport au plan équatorial de la terre grâce à un angle  $\delta$  appelée déclinaison du soleil. Le mouvement du soleil se manifeste par une variation de  $\delta$  entre deux valeurs extrêmes  $+\delta$  et  $-\delta$  par rapport à l'équateur terrestre, avec  $\delta_0=23,7^\circ \approx 23.45^\circ$

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (N - 80) \right] \quad (1-39)$$

N : le nombre de jours de l'année

##### L'angle horaire du soleil H :

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu passant par le sud. Il mesure la course du soleil dans le ciel.

L'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation suivante :

$$H = 15(TSV - 12) \quad (1-40)$$

TSV : temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.

H varie entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ .

#### ✚ Par rapport au plan horizontal du lieu :

##### La hauteur du soleil h :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\sin h = \cos H \cos \delta \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi \quad (1-41)$$

h varie entre  $+90^\circ$  et  $-90^\circ$

on prend:             $h > 0$     le jour  
                            $h < 0$     la nuit  
                            $h = 0$     aux lever et coucher

### **Azimet du soleil a**

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimet du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation suivante :

$$\sin a = (\cos \delta \sin H) / \cosh \quad (1-42)$$

a :varie entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$

### **I-2-7-2 Coordonnées du capteur [31]:**

Un capteur quelconque R est défini par deux angles  $(\gamma, \alpha)$  en coordonnées horizontales

#### **La hauteur de la normale du capteur $\gamma$ :**

C'est l'angle que fait la normale du capteur et sa projection sur le plan horizontal.

$$\gamma \text{ varie entre } -90^\circ \text{ et } +90^\circ \left\{ \begin{array}{l} \gamma > 0 \quad \textit{plan tourné vers le haut} \\ \gamma < 0 \quad \textit{plan tourné vers le bas} \\ \gamma = +90 \quad \textit{plan horizontal tourné vers le haut} \\ \gamma = -90 \quad \textit{plan horizontal tourné vers le bas} \\ \gamma = 0 \quad \textit{plan vertical} \end{array} \right.$$

**Azimet du capteur  $\alpha$  :**

C'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud .

$$\alpha \text{ Varie entre } -180^\circ \text{ et } +180^\circ \left\{ \begin{array}{ll} \alpha > 0 & \text{vers l'ouest} \\ \alpha < 0 & \text{vers l'est} \\ \alpha = 0 & \text{plan sud} \\ \alpha = -90 & \text{plan Est orienté vers l'Est} \\ \alpha = +90 & \text{plan Ouest orienté vers l'ouest} \\ \alpha = 180 & \text{plan Nord orienté vers le Nord} \end{array} \right.$$

**I-2-7-3 Angle d'incidence sur un capteur plan :**

Par définition, l'angle d'incidence  $i$  est l'angle de la direction du soleil avec la normal au plan.

$$\cos(i) = \cos(\alpha - a) \cos(\gamma) \cos(h) + \sin(\gamma) \sin(h) \quad (1-43)$$

**I-2-8 ENERGIE REÇUE PAR UN CAPTEUR PHOTOVOLTAÏQUE :**

le rayonnement solaire globale ( $G$ ) reçue par un capteur incliné de  $\beta$  par rapport à un plans horizontal est composée de deux rayonnement ,direct( $S$ ) et diffus( $D$ ) . Ses rayonnements varient aléatoirement en fonction de la hauteur du soleil, l'angle d'incidence, des intempéries de l'état de visibilité de l'atmosphère .le calcul de ces rayonnement est très compliqué, on utilise des méthodes approchées.

Pour l'Algérie la méthode empirique de PERRIN DE BRICHAMBAUT donne de bons résultats pour l'estimation de l'énergie reçue par un capteur. [26]

**I-2-8-1 Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair) : [20]**

Les puissances du rayonnement direct  $E_S$ , diffus  $E_D$  et global  $E_G$  reçues par un capteur ( $\alpha, \gamma$ ) incliné de  $\beta$  par rapport au plan horizontal sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} E_S = A \cos(i) e^{\frac{-1}{B \sin(h+2)}} \\ E_D = \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) D_H + \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) a^* G_H \\ E_G = E_S + E_D \end{cases} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} D_H = A' (\sin(h))^{0.4} \\ G_H = A'' (\sin(h))^{B''} \end{cases} \quad (1-44)$$

$$[ES]=[ED]=[EG]=W/m^2$$

DH : éclairage diffus reçu par une surface horizontale.

GH : éclairage global reçu par une surface horizontale.

a\* : l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol).

$$a^* = \begin{cases} 0,9 \text{ à } 0,8 \text{ neige} \\ 0,8 \text{ à } 0,4 \text{ sol clair,} \\ 0,4 \text{ à } 0,2 \text{ verdure} \end{cases}$$

Pour Tlemcen  $a^* = 0,2$

Etat de l'atmosphère	A	B	A'	A''	B''
Ciel bleu foncée	1300	6	87	1150	1.15
Ciel bleu clair	1230	4	125	1080	1.22
Ciel bleu laiteux	1200	2.5	187	990	1.25

*Tableau1-2 : les constantes caractéristiques l'état de l'atmosphère*

### **I-2-8-2 Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert) : [20]**

Le ciel couvert est un ciel gris totalement rempli de couches nuageuse, plus ou moins denses optiquement, mais au travers desquelles il n'est pas possible de distinguer le disque solaire, dans ces conditions le rayonnement direct est inexistant et le rayonnement global ne se compose que de rayonnement diffus.

Si la couverture nuageuse est homogène on peut considérer que le rayonnement diffus du ciel est isotrope de même que le rayonnement diffus du sol.

Le rayonnement global par le ciel couvert est :

$$E_G' = E_D' = K E_G (1 + 0.3 \sin h) \quad (1-45)$$

Avec :

$K=0.6$  pour le ciel bleu foncée.

$K=0.3$  pour le ciel bleu clair.

$K=0.15$  pour le ciel bleu laiteux.

Pour Tlemcen on prend le cas de ciel clair ( $k=0.3$ ).

### I-2-8-3 Estimation de l'énergie journalière incidente : [32]

L'énergie journalière reçue par un capteur plan quelconque dépend en générale de la latitude des couches atmosphériques et des conditions météorologique est donnée par :

$$\begin{cases} E_{js} = \frac{1}{k} \Delta T \sum_k E_S \\ E_{jD} = \frac{1}{k} \Delta T \sum_k E_D \\ E_{jD} = \frac{1}{k} \Delta T \sum_k E_G \end{cases} \quad (1-46)$$

$E$  : l'énergie instantanée (directe, diffus, globale) incidente sur le capteur.

$K$  : le nombre d'intervalle entre le lever et le coucher sur le capteur.

$\Delta T$  : la différence entre le temps du lever et du coucher sur le capteur.

$E_J$  : l'énergie journalière (directe, diffuse ou globale) incidente sur le capteur.

### I-2-8-4 Estimation de l'énergie annuelle incidente : [32]

L'énergie annuelle reçue par un capteur d'orientation quelconque est déterminée par un programme de simulation en faisant la somme des énergies journalières :

$$\begin{cases} E_{aS} = \sum_1^N E_{JS} \\ E_{aD} = \sum_1^N E_{JD} \\ E_{aG} = \sum_1^N E_{JG} \end{cases} \quad (1-47)$$

$E_a$  : l'énergie annuelle (directe, diffuse ou globale) incidente sur le capteur

## I-2-9 Avantages et inconvénients d'une installation PV :

### a)Avantages : [23]

#### ❖ **Son carburant est gratuit :**

Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire. Et le soleil brillera jusqu'à la fin des temps. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non toxique (second matériau le plus abondant sur Terre).

#### ❖ **L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants :**

L'électricité solaire utilise seulement l'énergie du soleil comme carburant. Elle ne crée aucun co-produit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique.

#### ❖ **Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité :**

L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs

#### ❖ **Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés.** Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.

#### ❖ **L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance :**

Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.

#### ❖ **L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées :**

Les systèmes photovoltaïques apportent une valeur ajoutée aux zones rurales (en particulier dans les pays en développement où il n'y a pas de réseau électrique disponible).

❖ **L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments :**

Les modules solaires peuvent couvrir toits et façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique

❖ **L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la Consommation mondiale pendant une année :**

Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale

**b) Inconvénients :**

Le développement du photovoltaïque est rapide, mais représente encore peu de chose dans le bilan énergétique mondial.

L'ensemble des modules existant actuellement produit autant d'énergie que 20 % d'une tranche nucléaire. Ce n'est notamment pas une solution significative pour répondre immédiatement aux enjeux nationaux actuels. [25]

- ❖ 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 (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.
- ❖ 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 régulation associés soient judicieusement choisis
- ❖ Tributaire des condition météorologiques.
- ❖ Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à230 V alternatif. Or, l'énergie issus du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur. [33]

# *BIBLIOGRAPHIE*

[1] : [www.energies-renouvelables.org](http://www.energies-renouvelables.org)

[2] : Nicolas LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » thèse de doctorat de L'INPG Spécialité Génie Electrique Institut national polytechnique de décembre 2005

[3] Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.

[4] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens – intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004

[5] <http://oooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html>

[6] : C.Boris et G. Christophe « Energie éolienne, fonctionnement, contraintes et perspective sue l'avenir <http://membres.lycos.fr/tipemaster/TIPE/Eole.html>

[7] C. Benoudjit « étude pour la conception d'un banc d'essais pour énergie éolienne » : thèse de magistère de l'université de Batna, juin 2004

[8] : Frédéric POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrone à double alimentation reliée au réseau » thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003

[9] :N. KASBADJI MERZOUK « Evaluation du Gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profile vertical de la vitesse de vent en Algérie» thèse de doctorat de l'université de Tlemcen, 2006

[10] : L. KHTTACHE «Etude et commande d'un système Eolien à base d'une Machine Electrique Double Alimentée »Thèse de magister université de Batna ,2007

[11]: O. GERGAUD « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » thèse de doctorat de l'école Normale supérieur de CACHAN, 2002

[12] encyclopédie encarta 2008

[13] : L, AICHE-HAMAE.A.KHELLAF. « Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie » congrée sur le photovoltaïque et l'énergie éolienne (IPCWE) Tlemcen, Algérie (Novembre2003).

[14] A. ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » thèse de doctorat à l'institut national polytechnique de Toulouse ,2007

- [15] L.MRED « contribution à l'étude d'un système d'aérogénérateur à rendement élevé, Application au site de Tlemcen » Thèse de magister université de Tlemcen ,2001
- [16] : L.MERAD, Boumédiène BENYOUCEF et Jean Pierre CHARLES « Etude technico-économique d'un système hybride (aérogénérateur et moteur diesel) pour la production d'électricité » Afrique SCIENCE 02(2) (2006) 187 – 197 ISSN 1813-548X
- [17] :M. BELHADJ « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque Autonome »thèse de magister université de Bechar
- [18] :RP .Mukund, « wind and solar power systems »,Ph.D,PeU.S merchant Marine Academy, Kings point ,New York,CRC Press LLC 1999.
- [19]: N. OLEKSIY « simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacts arrières interdigites »thèse de doctorat à l'institut national des sciences appliquées de lyons
- [20] :H. BELGHITRI « Estimation des énergie reçues par un capteur au fil du soleil » mémoire de fin d'études, université de Tlemcen, 2002
- [21] <http://membres.lycos.fr/tpepaillardbaroux/notions.htm>
- [22] : F Benyarou « conversion des énergies » document de cours (EN01), Université de Tlemcen 2001-2002
- [23] : M. Serge Poignant « Rapport d'informatique» déposé en application de l'article 145 du Règlement par la commission des affaires économique sur l'énergie photovoltaïque , assemblée nationale constitution de 4 octobre 1958
- [24] : Les Dossiers Environnement de GAZACA «Les énergies renouvelables (partie II – L'énergie Solaire)» : Mai 2006 [www.GAZACA.com](http://www.GAZACA.com)
- [25] [www.techno-science.net](http://www.techno-science.net)
- [26] : S MEJDOUB « simulation et optimisation des paramètre photo solaire » thèse de magister 2001, université de Tlemcen
- [27] :R MAOUADJ « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah » thèse de magister Université de Tlemcen 2005
- [28] : K TAHRI « Exploitation informatisée de l'énergie d'un générateur photovoltaïque appliquée aux sites de Tlemcen et Bouzaréah » thèse de magister Université de Tlemcen 2006
- [29] : T .Fogelman, « système photovoltaïque pour les pays en développement », manuel d'installation et d'utilisation, agence Française pour la maîtrise de l'énergie, (AFME)
- [30] : [www.solarelectripower.org](http://www.solarelectripower.org)

[31] : F Benyarou « conception assistée par ordinateur des système photovoltaïque modélisation, dimensionnement et simulation » thèse de doctorat Université de Tlemcen 2004

[32] :P.De Brichambaut « Evaluation énergétique d'un gisement solaire », Tec et Doc ,1984

[33] : [www.inti.be](http://www.inti.be)

[34] :B. Chikh –Bled, « Etude du rendement de stockage d'un système photovoltaïque appliqué au pompage hydraulique » thèse de magister Université de Tlemcen 2001

## *CHAPITRE 2*

# *La modélisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque*

## *NOMENCLATURE*

$I_{ph}$  : photo courant (A)

$I_D$  : courant générer par la diode (A)

$I_{RP}$  : courant traversant  $R_p$  (A)

$R_p$  : résistance parallèle de la cellule ( $\Omega$ )

V: tension de la cellule (V)

$R_S$ : résistance série de la cellule ( $\Omega$ )

$I_0$  : courant de saturation (A)

A : facteur d'idéalité de la cellule (.)

$I_{CC}$  : courant de court circuit (A)

FF : Facteur de forme

$\eta_m$  : Rendement énergétique maximum (%)

S : Surface de la cellule solaire ( $m^2$ )

$\phi$  : Flux incident

$V_m$  : tension au point de fonctionnement (V)

$I_m$  : courant au point de fonctionnement (A)

ZCE : zone de charge d'espace

$R_{Se}$  : résistance série du module ( $\Omega$ )

$R_{Pe}$  : résistance parallèle du module ( $\Omega$ )

EG : irradiation solaire sur le plan incliné du module photovoltaïque

S : surface du module photovoltaïque ( $m^2$ )

$A_P$  : nombre de module constituant le champ photovoltaïque.

$\eta_{ch}$  : Le rendement maximum de conversion du champ photovoltaïque (%)

$\eta_0$  : Rendement de résistance des modules constituant le champ photovoltaïque sous conditions standards ( $T_C=25^\circ C$ ,  $E_G=1000W/m^2$ ) (%)

$\eta(E_G)$  : Facteur de correction du rendement du champ du rayonnement (%)

$\eta(T_C)$  Facteur de correction du rendement du à la température de jonction

P (V) : Fonction de puissance de l'aérogénérateur

$f(V)$  : : Fonction de distribution de la vitesse du vent

$V_d$  : la vitesse de démarrage ( $\text{ms}^{-1}$ )  
 $V_n$  : la vitesse nominale ( $\text{ms}^{-1}$ )  
 $V_m$  : la vitesse d'arrêt de la machine ( $\text{ms}^{-1}$ )

$k$  : est le facteur de forme

$C$  : est le facteur d'échelle ( $\text{m/s}$ )

$C_1$  : paramètre d'échelle à 10ma.d.s ( $\text{m/s}$ )

$k_1$  : paramètre de forme à 10m a.d.s

$\bar{p}$  : La puissance produite par un aérogénérateur

$C_{\text{Bat}(t)}$  : la quantité de la charge de la batterie au temps ( $t$ ) (Ah)

$C_{\text{Bat}(t-1)}$  la quantité de la décharge de la batterie au temps ( $t$ ) (Ah)

$\eta_{\text{Bat}}$  : Le rendement de la batterie (%)

$C_{\text{Bat max}}$  : la capacité de la batterie maximale

$C_{\text{Bat min}}$  : la capacité de la batterie minimum

DOD : la profondeur de la charge

SOC : La valeur maximale de l'état de charge

VF : est la force électromotrice (V)

$b$  : est une tension empirique

$P_n$  : la puissance nominale de l'onduleur

$P_{\text{charge}}$  : puissance à la sortie de l'onduleur

$\eta_{\text{ond}}$  : Le rendement de l'onduleur (%)

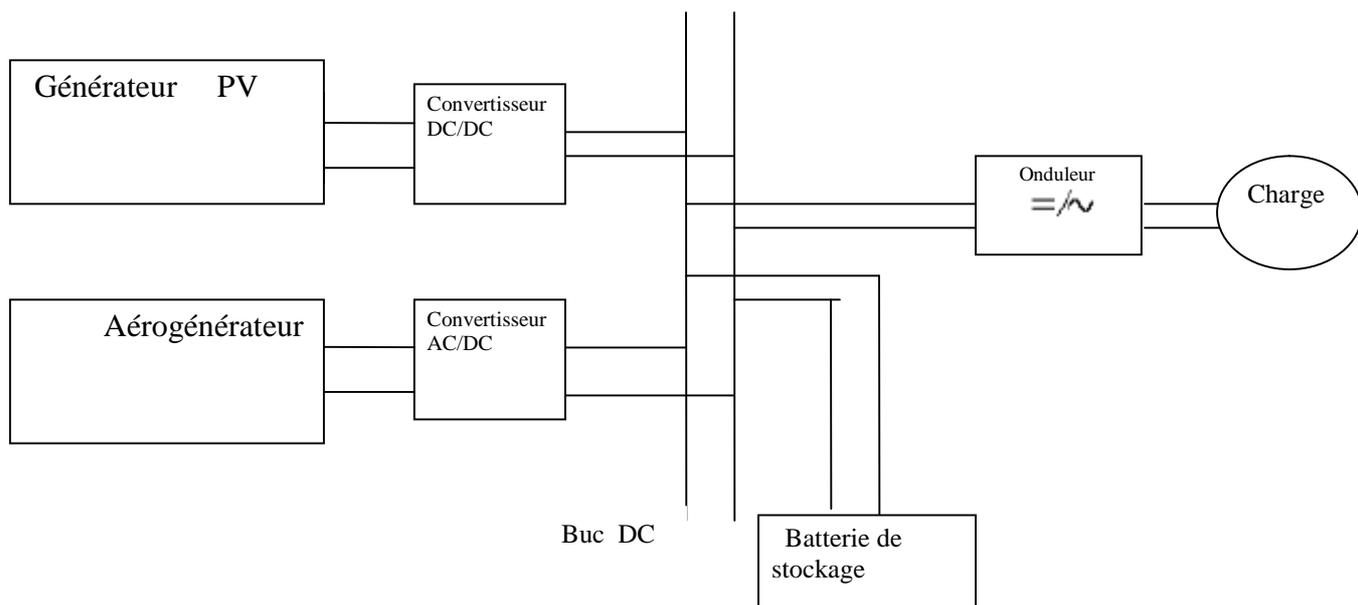
## Chapitre 2

### La modélisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque

#### II -1 La modélisation d'un système hybride éolien –photovoltaïque :

La modélisation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique. Elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée.

A cet effet, la modélisation est nécessaire pour établir une relation entre l'énergie produite par le système hybride éolien –photovoltaïque et la demande de l'utilisateur.



*Fig (2-1) : système hybride éolien –photovoltaïque*

## II -2 La modélisation du champ photovoltaïque

### II -2-1 La modélisation d'une cellule solaire :

Le schéma équivalent de la cellule solaire réel pour un flux incident et une température fixe, est le suivant : [1]

En appliquons la loi de kirchoff aux nœuds A, B :

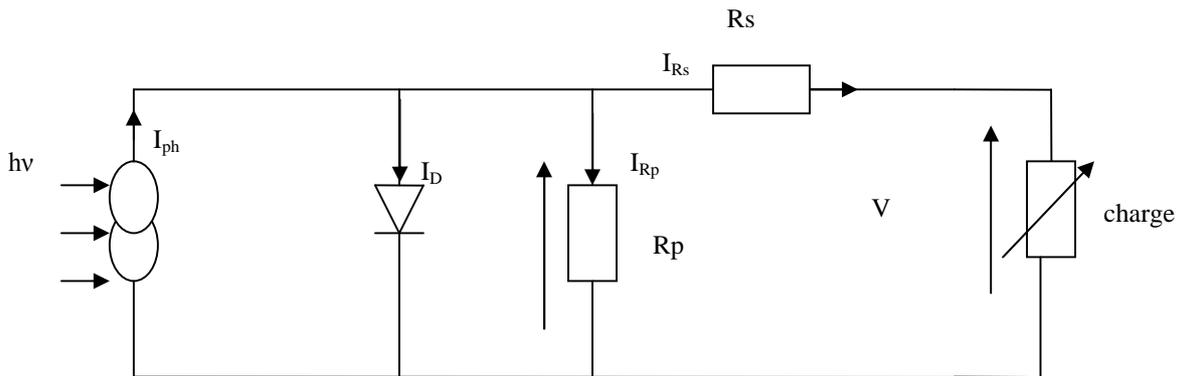


Fig. (2-2):schéma électrique équivalent d'une cellule PV

$$I = I_{ph} - I_D - I_{RP} \quad (2-1)$$

Le courant débité par la cellule est la somme algébrique de trois courants :

$I_{ph}$  : photo courant indépendant de  $V$  (ou de  $R_s$ ), il est proportionnel au flux incident (taux de génération –recombinaison) et aux longueurs de diffusion des porteurs [2]:

$$I_{ph} = qg (L_n + L_p) \quad (2-2)$$

$I_{RP}$  : courant traversant  $R_p$ , si  $R_p$  est très grande, il devient très faible est indépendant de la tension :

$$I_{RP} = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2-3)$$

Car  $V_D = R_p I_{RP} = V + R_s I$

$I_D$  : courant de diode, il est de même ordre de grandeur que  $I_{RP}$  pour les faibles tensions et il devient très grand au voisinage de  $V_{CO}$ , il s'écrit sous la forme [2]:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qV_D}{AKT}} - 1 \right) \tag{2-4}$$

Remplaçons dans (2-2) les équations (2-3), (2-4) , l'équation caractéristique devient :

$$I = I_{Ph} - I_0 \left[ e^{\frac{q}{AKT}(V+R_S I)} - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_P} \tag{2-5}$$

A : facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace .pour les cellule actuellement commercialisées au silicium : A=1

La représentation graphique I=f (V) est :

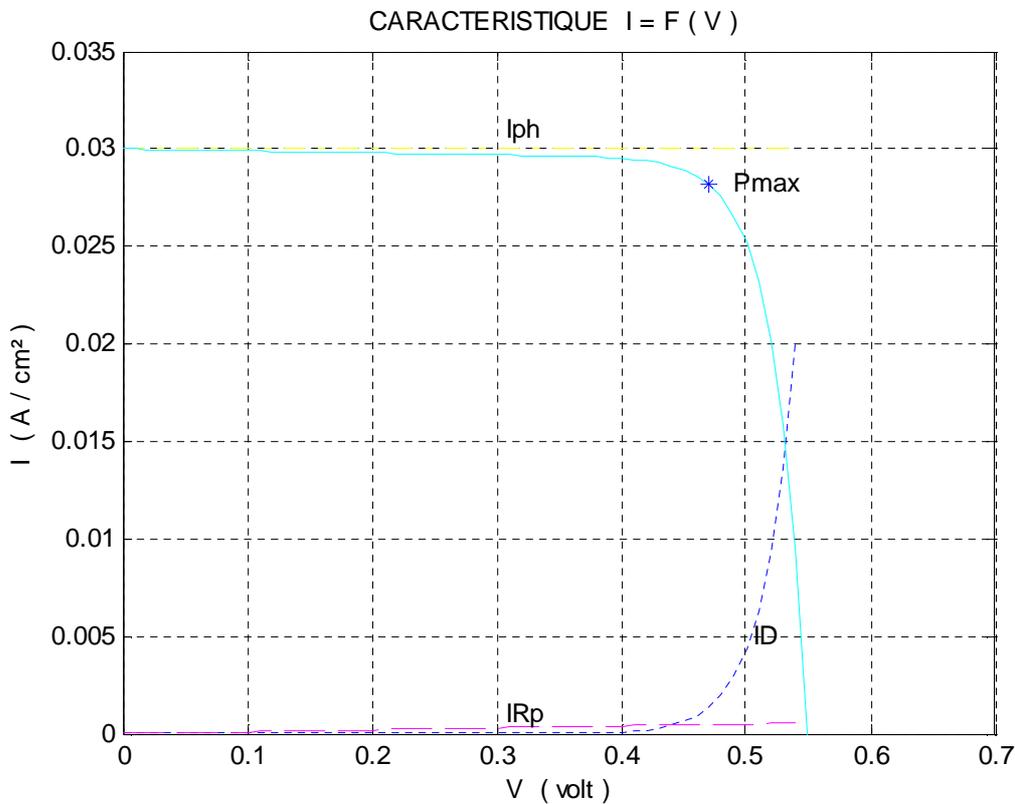


Fig (2-3) : la caractéristique d'une cellule solaire

## II 2-2 caractéristiques I=f (V) d'une cellule solaire :

La caractéristique I=f(V) représente la courbe de puissance ,sachant que le courant généré est donné par la formule (2-5) et que la cellule fonctionne sous un éclairement fixe et une température constante T. selon la valeur de  $R_C$  (résistance de charge ; on distingue trois zones de fonctionnement :

**Zone MN** : correspond aux faible valeurs de  $R_C$ , I est donné presque constant la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de  $I_{CC}$ ). Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles des courant élevés et des tensions petites.

**Zone PS** : région correspondante aux valeurs élevées de  $R_C$ . La cellule se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert  $V_{CO}$  le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.

**Zone NP** : correspondante aux valeurs moyennes de  $R_C$  .la cellule n'est considère ni comme générateur de tension ni comme générateur de courant .le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissance élevées, des courants et des tension acceptables .

## II -2-3 paramètres caractéristiques d'une cellule solaire :

### Courant de court circuit $I_{CC}$ :

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation (2-5)

$$I_{CC} = I_{Ph} - I_0 \left[ e^{\frac{qR_S I_{CC}}{KT}} - 1 \right] - \frac{R_S I_{CC}}{R_P} \quad (2-6)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ( $R_S \rightarrow 0$  et  $R_P \rightarrow \infty$ )

$$I_{CC} = I_{Ph} = qg(L_n + L_p) \quad (2-7)$$

Tenant compte de l'effet des résistances  $R_S$  et  $R_P$  ; le courant de court circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

**Tension en circuit ouvert  $V_{CO}$  :**

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (2-5)

$$0 = I_{Ph} - I_0 \left[ e^{\frac{qV_{CO}}{AKT}} - 1 \right] - \frac{V_{CO}}{R_P} \quad (2-8)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ( $R_S \rightarrow 0, R_P \rightarrow \infty, I_{Ph} = I_{CC}$  et  $A = 1$ )

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \text{Log} \left[ 1 + \frac{I_{CC}}{I_0} \right] \quad (2-9)$$

$V_{CO}$  augmente quand  $I_0$  diminue, elle ne dépend que de la nature du cristal et de jonction

**Facteur de forme FF :**

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{P_{\max}}{P_{opt}} = \frac{I_m V_m}{I_{CC} V_{CO}} \quad (2-10)$$

Il caractérise l'influence mixte des résistances série et parallèle sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

**Rendement énergétique maximum  $\eta_m$  :**

Le rendement énergétique maximum est le rapport de la puissance maximale fournie ( $P_{\max}$ ) sur la puissance du rayonnement solaire incident ( $P_i$ )

$$\eta_m = \frac{P_{\max}}{P_i} = \frac{I_m V_m}{S \phi} \quad (2-11)$$

$S$  : Surface de la cellule solaire.

$\phi$  : Flux incident.

( $I_m, V_m$ ) : Coordonnées de point de fonctionnement.

## II -2-4 Facteur limitant le rendement :

### ❖ L'influence de l'éclairement :

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique  $I=f(V)$  suivant l'axe des courants.

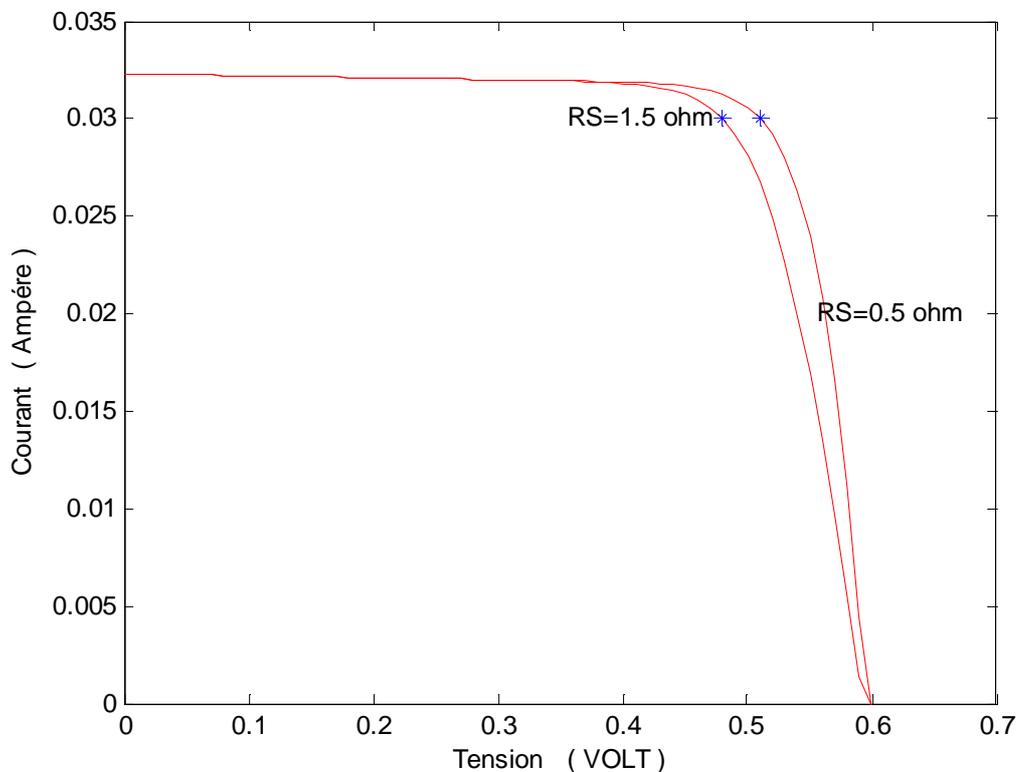
L'accroissement du courant de court circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique .[3]

### ❖ L'influence de la résistance série $R_S$ :

La résistance série caractérise les pertes par effet joule de la résistance propre du semi conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

Les semi conducteur -électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion. [4]

L'influence de la résistance série sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur la figure (2-2)



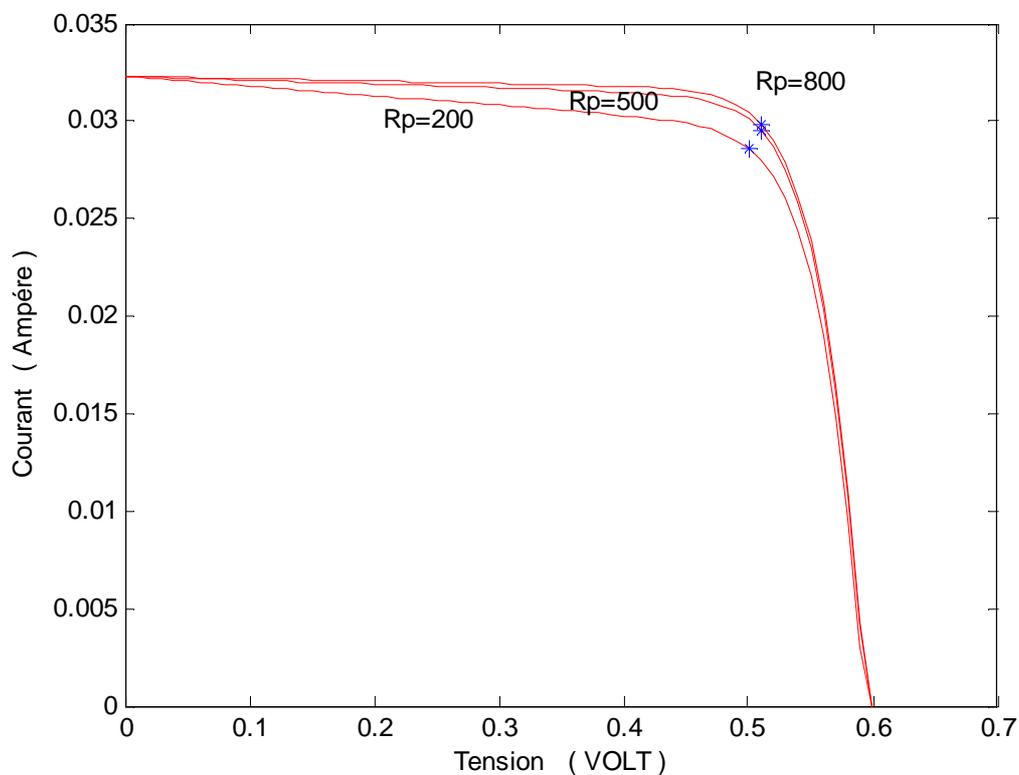
*Fig (2-2) : influence de  $R_S$  sur la caractéristique  $I=f(V)$*

### ❖ L'influence de la résistance parallèle :

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau semi conducteur et de l'épaisseur des régions Net P et de la zone de charge et d'espace (ZCE).

L'existence de fissures et de défaut de structures complexe devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle ( $R_P$ ). [4]

L'influence de la résistance parallèle sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur la figure (2-3).



*Fig (2-3) : influence de  $R_P$  sur la caractéristique  $I=f(V)$*

### ❖ L'influence de la température :

Si la température de la cellule augmente, le photo- courant  $I_{Ph}$  augmente également due principalement à la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Cette augmentation est de l'ordre de 0.01% degré  $C^\circ$ . Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2mV par cellule. La diminution de la puissance fournie est estimée environ de 0.5 % par degré pour un module. [5]

L'influence de la température sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur la figure (2-4).

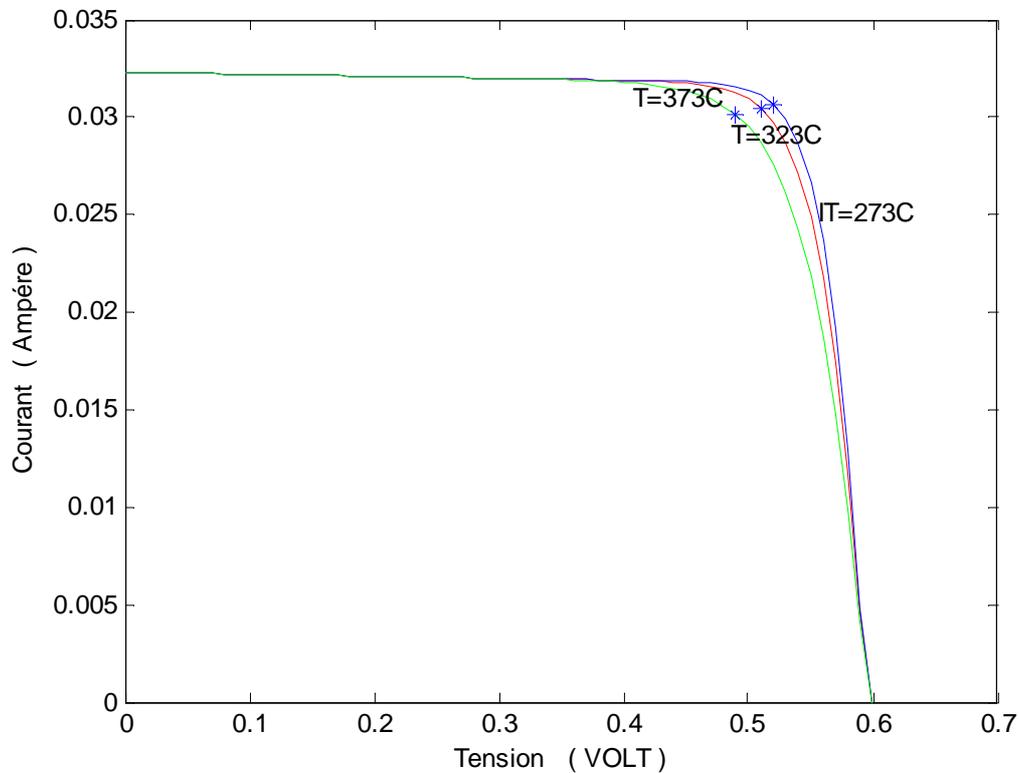


Fig (2-4) : influence de la température sur la caractéristique  $I = f(V)$

## II -2-5 Groupement des cellules solaires

### a) Module photovoltaïque

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (groupement en série de  $n$  cellule identiques) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante [6] :

$$I' = I_{Ph} - I_0 \left[ \frac{q}{nAKT} (V + R_{Se} I') - 1 \right] \frac{V + R_{Se} I'}{R_{Pe}} \quad (2-12)$$

Avec  $R_{Se}$  et  $R_{Pe}$  résistance série et parallèle du module défini par :

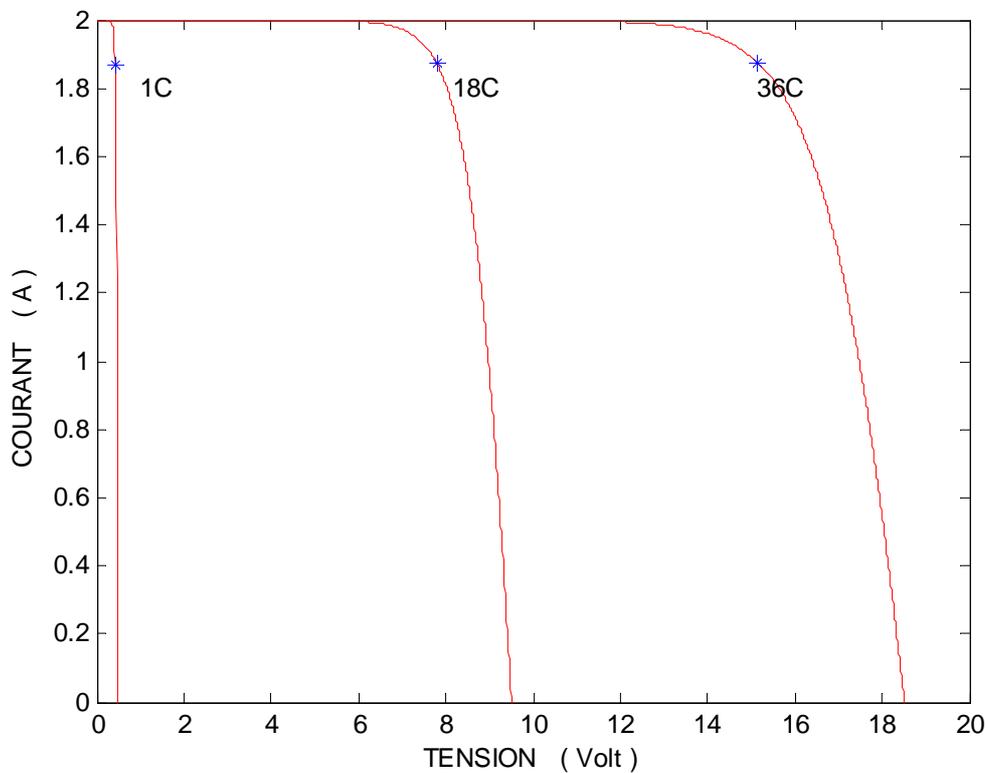
$$R_{Se} = nR_S \quad \text{et} \quad R_{Pe} = nR_P \quad V' = nV$$

La représentation graphique de l'équation  $I=f(V)$  pour un module constitué de 36 cellules identiques, à une surface de 78,5 cm<sup>2</sup>, ayant une résistance série  $R_s=0.01 \Omega$  et une résistance parallèle  $R_p=10^3 \Omega$ .

Les grandeurs caractéristiques de ce module sont :

$V_{CO}=18.5$  volt,  $I_{CC}=2$ A,  $FF=0.78$ ,  $\eta=10.06$  %,  $P_{max}= 28.42$ W

$V_m=15.15$ ,  $I_m=1.87$ A ,  $R_m=V_m/I_m=8.07 \Omega$



**Fig (2-5) : la caractéristique  $I=f(V)$  d'un module photovoltaïque**

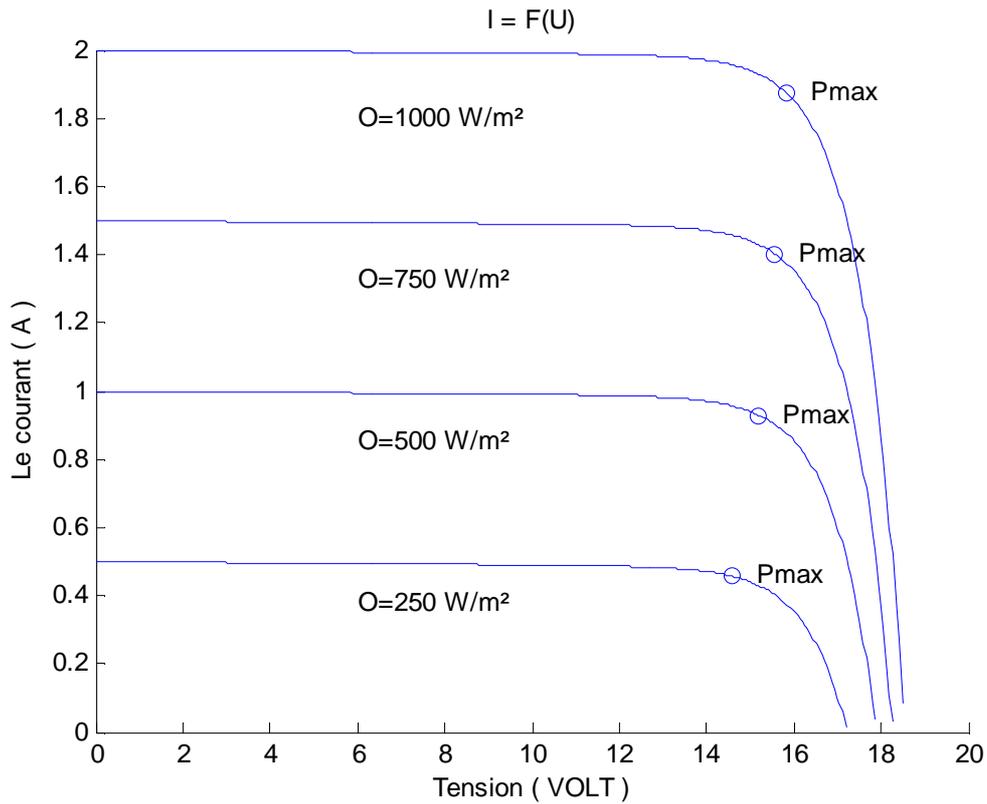


Fig (2-6) : influence du flux sur la caractéristique  $I = f(V)$  d'un module

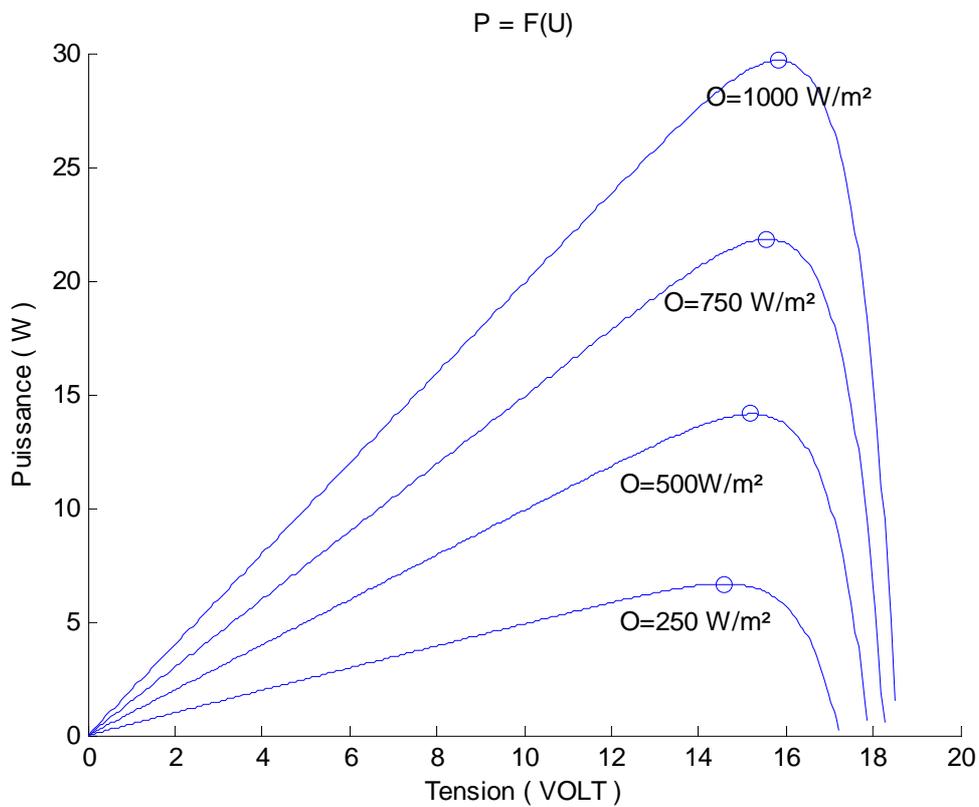


Fig (2-7) : influence du flux sur la caractéristique  $P = f(V)$  d'un module

**b) Panneau photovoltaïque :**

La modélisation d'un panneau composé  $N_S$  modules en série et  $N_P$  modules en parallèle est [4] :

$$I = N_P \cdot I_{Ph} - N_P \cdot I_0 \left[ e^{\frac{q}{nAKTN_S}(V+R_{Se}I)} - 1 \right] - N_P \frac{V + R_{Se}I}{R_{Pe}} \quad (2-13)$$

Avec  $R_{Se}$  et  $R_{Pe}$  résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_{Se} = n \frac{N_S}{N_P} R_S \quad \text{et} \quad R_{Pe} = n \frac{N_S}{N_P} R_P \quad (2-14)$$

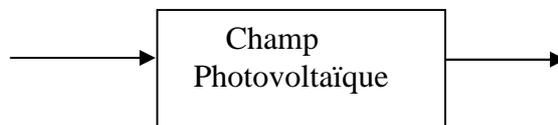
La détermination de la caractéristique d'un générateur en configuration mixte utilise un simple combinaison des cas série et parallèle et est réalisée ainsi en deux étapes :

- Détermination de la caractéristique résultante de chaque branche en se ramenant au cas série.
- Détermination de la caractéristique du générateur en associant en parallèle toutes les caractéristiques des branche déterminées dans la première étape.

**II -2-6 Le Modèle de la puissance à l'entrée du champ photovoltaïque :**

La puissance à l'entrer  $P_e$  du champ PV est représentée par [7] :

$$P_e = E_G \cdot S \cdot A_P \quad (2-15)$$



Avec

$E_G$  : irradiation solaire sur le plan incliné du module photovoltaïque ( $W/m^2$ ).

$S$  : surface du module photovoltaïque ( $m^2$ ).

$A_P$  : nombre de module constituant le champ photovoltaïque.

## II -2-7 Rendement photovoltaïque :

Le rendement maximum  $\eta_{ch}$  de conversion du champ photovoltaïque est donné par la relation suivante [8] :

$$\eta_{ch} = \frac{P_{\max}}{E_G A_p S} \quad (2-16)$$

Le rendement n'est pas constant, il dépend de la température T et du rayonnement  $E_G$ . Pour le silicium cristallin, la relation du rendement est [9] :

$$\eta_{ch} = \eta_0 \cdot \eta(E_G) \cdot \eta(T_C) \quad (2-17)$$

Ou :

$\eta_0$  :Rendement de résistance des modules constituant le champ photovoltaïque sous conditions standards ( $T_C=25^\circ\text{C}$ ,  $E_G=1000\text{W/m}^2$ )

$\eta(E_G)$  : Facteur de correction du rendement du champ du rayonnement, définie par :

$$\eta(E_G) = a - \frac{b}{E_G} \quad (2-18)$$

a et b sont des valeurs déterminées expérimentalement (a=1.059 et b=31.444w<sup>2</sup>)

$\eta(T_C)$  : Facteur de correction du rendement du à la température de jonction défini par [9] :

$$\eta(T_C) = 1 - \varepsilon (T_C - T_R) \quad (2-19)$$

Avec :

$T_R$  : température de référence expérimentalement .il est défini comme étant la variation du rendement du module pour une variation de  $1\text{C}^\circ$  de température de la cellule.

$\varepsilon$  : est déterminé expérimentalement Il définit comme étant la variations du rendement du module pour une variation de  $1\text{c}^\circ$  de température de la cellule. Ces valeurs typiques de ce coefficient se situent entre  $0.003$  et  $0.005(\text{C}^{-1})$

$T_C$  : la température de la cellule solaire

## II -2-8 Le Modèle de la puissance à la sortie du champ photovoltaïque :

La puissance à la sortie  $P_S$  du champ photovoltaïque est représentée par la relation suivante [3] :

$$P_{Ch} = \eta_{Ch} P_e \quad \text{d'où} \quad P_{Ch} = \eta_{Ch} \cdot G_B \cdot S \cdot A_P \quad (2-20)$$

Avec :

$\eta_{Ch}$  : Le rendement du champ photovoltaïque

$P_e$  : la puissance à l'entrée du champ photovoltaïque

La modélisation de l'énergie reçue par un capteur dépend de son orientation et de son angle d'incidence.

Parmi les champs PV recevant le maximum d'énergie journalière et annuelle, on trouve le champ PV à deux axes.

### a) Caractéristiques du capteur qui suit le soleil :

Un capteur à deux axe est un capteur qui suit le soleil en site et en azimut et généralement il est perpendiculaire aux rayon solaire à chaque instant de la journée ces coordonnées sont [10] :

$$\alpha = a, \quad \gamma = h, \quad \text{et} \quad i = 0 \quad .$$

La puissance de rayonnement direct ( $E_S$ ) et diffus ( $E_D$ ) et globale ( $E_G$ ) reçues par ce capteur sont données par la relations suivantes :

$$\begin{cases} E_S = A e^{\frac{-1}{B \sin(h+2)}} \\ E_D = \left( \frac{1 + \sin(h)}{2} \right) D_H + \left( \frac{1 - \sin(h)}{2} \right) a * G_H \\ E_G = E_S + E_D \end{cases} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} D_H = A' (\sin(h))^{0.4} \\ G_H = A'' (\sin(h))^{B''} \end{cases} \quad (2-21)$$

### b) Caractéristiques de site

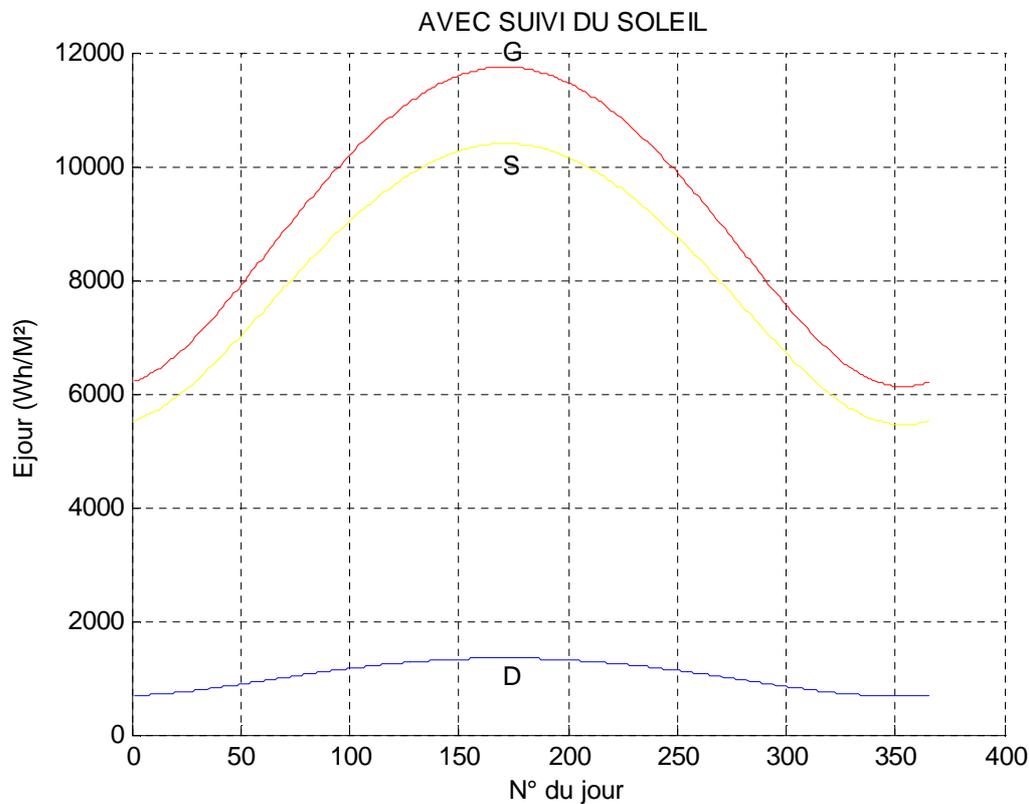
Les caractéristiques de site de Tlemcen sont données par les grandeurs météorologiques suivantes :

Le site	Latitude	Longitude	Albédo	Altitude	Inclinaison du panneau solaire
Tlemcen	34.56	1.19	0.20	0.816	35

La simulation de l'énergie instantanée et journalière incidente sur un champ PV, est basée sur un champ modèle dérivé des modèle empirique de P.De BRICHAMBOU et KASTEN pour les différent états du ciel.

La connaissance de cette énergie à chaque instant de la journée et de l'année permet l'analyse fine de système de captation.

## II -2-9 Simulation de l'énergie journalière :



**Fig (2-8) : Estimation d'énergie globale, directe et diffus pour un capteur qui suit le soleil pour un ciel bleu clair au site de Tlemcen**

D'après la courbe ci-dessus, l'énergie journalière varie en fonction de quantième de l'année. Le maximum d'énergie globale directe et diffus correspond SE.

Les résultats d'énergie journalière incidente globale, directe et diffuse sont donnés par le tableau suivant :

saison	E globale	E direct	E diffus
EP-EA	9335	8273	1062
SE	11743	10399	1344
SH	6125	5451	675

Tableau (2-1) : Estimation d'énergie journalière globale, direct et diffus

II -2-10 Simulation de l'énergie instantanée incidente :

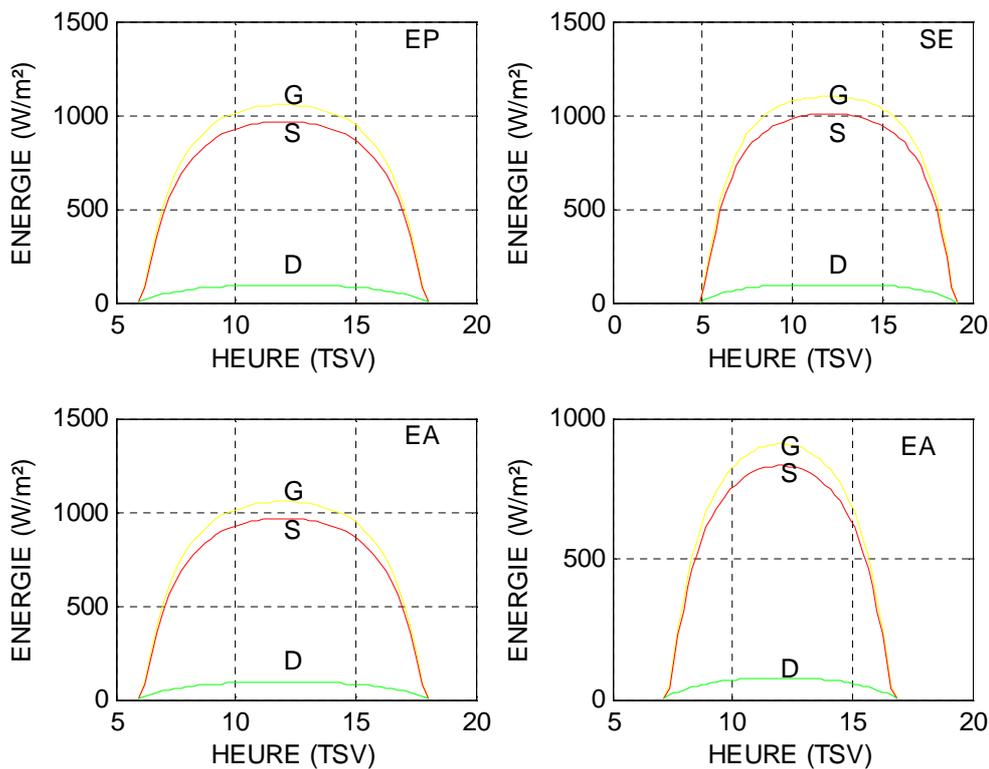


Fig (2-9) : énergie instantanée incidente sur le capteur qui suit le soleil pour un ciel bleu claire au site de Tlemcen

D'après les courbes représentant respectivement la variation de l'énergie en fonction du temps pour les quatre saison (SH, EP, EA, SE) par un ciel bleu claire, on constate que l'énergie est a peu près constante durant toutes la journée.

La valeur maximale correspond à 12 TSV elle vaut  $1079.9w/m^2$  à SE

Les résultats d'énergie instantanée incidente globale, directe et diffuse à 12 TSV sont donnés par le tableau suivant :

Site	Tlemcen
Energie (w /m <sup>2</sup> )	Globale
SH	884
EP-EA	1034.8
SE	1079.9

**Tableau (2-2) Estimation d'énergie instantanée globale à 12 TSV**

## II -3La modélisation d'une turbine éolienne

### II -3-1 La puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur [11]

Etant donné que :

- la vitesse du vent est variable
- et que chaque machine éolienne est caractérisée par la vitesse de démarrage  $V_d$ , une vitesse nominale  $V_n$  et une vitesse d'arrêt  $V_m$  spécifiques, la puissance éolienne utilisable est donnée par : La relation suivante [12]

$$P(V) = \begin{cases} 0 & \text{Si } V < V_d \\ \alpha + \beta V + \gamma V^2 & \text{Si } V_d < V < V_n \\ P_n & \text{Si } V_n < V < V_m \\ 0 & \text{Si } V > V_m \end{cases} \quad (2-22)$$

Avec  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  déterminés par les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \alpha + \beta V_d + \gamma V_d^2 = 0 \\ \alpha + \beta V_n + \gamma V_n^2 = P_n \\ \alpha + \beta(V_d + V_n) + \gamma(V_d + V_n)^3 = P_n \left( \frac{(V_d + V_n)}{V_n} \right)^3 \end{cases} \quad (2-23)$$

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(V) f(V) dV \quad (2-24)$$

$P(V)$  : Fonction de puissance de l'aérogénérateur

$f(V)$  : : Fonction de distribution de la vitesse du vent

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right] \quad (2-25)$$

$K$  : est le facteur de forme et  $C$  : est le facteur d'échelle

Cette puissance dépend fondamentalement de deux paramètres [13] :

\_Le fonctionnement de la machine éolienne qui est défini par sa courbe de puissance  
\_vitesse de vent sur le site

On obtient après intégration de la relation (2-1) :

$$\bar{P} = \int_{V_d}^{V_n} (\alpha + \beta V + \gamma V^2) \frac{k_1}{C_1} \left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1}\right] dV + \int_{V_n}^{V_m} P_n \frac{k_1}{C_1} \left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1}\right] dV$$

L'intégrale  $I_2$  :

$$I_2 = \int_{V_n}^{V_m} P_n \frac{k_1}{C_1} \left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1}\right] dV$$

S'écrit sous la forme :

$$I_2 = P_n (F(V_m) - F(V_n))$$

Donc l'expression finale donnant la puissance produite par un aérogénérateur est :

$$\bar{P} = \int_{V_d}^{V_n} (\alpha + \beta V + \gamma V^2) \frac{k_1}{C_1} \left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{k_1}\right] dV + P_n \left[ \exp\left[-\left(\frac{V_n}{C_1}\right)^{k_1}\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_m}{C_1}\right)^{k_1}\right] \right] \quad (2-26)$$

## II -3-2 Facteur de puissance

Le facteur de puissance d'un système de conversion de l'énergie éolienne défini par le rapport de la puissance produite dans un régime de vent par sa puissance nominale (maximale)

$$F_p = \left( \frac{\bar{P}}{P_n} \right)$$

Où FC est le facteur de capacité donné par l'expression suivante [14]:

$$FC = \left( \frac{\exp\left[-\left(\frac{V_d}{C}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_n}{C}\right)^k\right]}{\left(\frac{V_n}{C}\right)^k - \left(\frac{V_d}{C}\right)^k} - \exp\left[-\left(\frac{V_m}{C}\right)^k\right] \right) \quad (2-27)$$

### II -3-3 résultats et interprétation :

Pour illustrer l'étude nous avons considéré un aérogénérateur du commerce dont Les caractéristiques sont les suivantes :

Pn(watt)	Vd(m/s)	Vn(m/s)	Vc(m/s)
1000	1	6	12

*Tableau (2-3) : caractéristique de l'aérogénérateur*

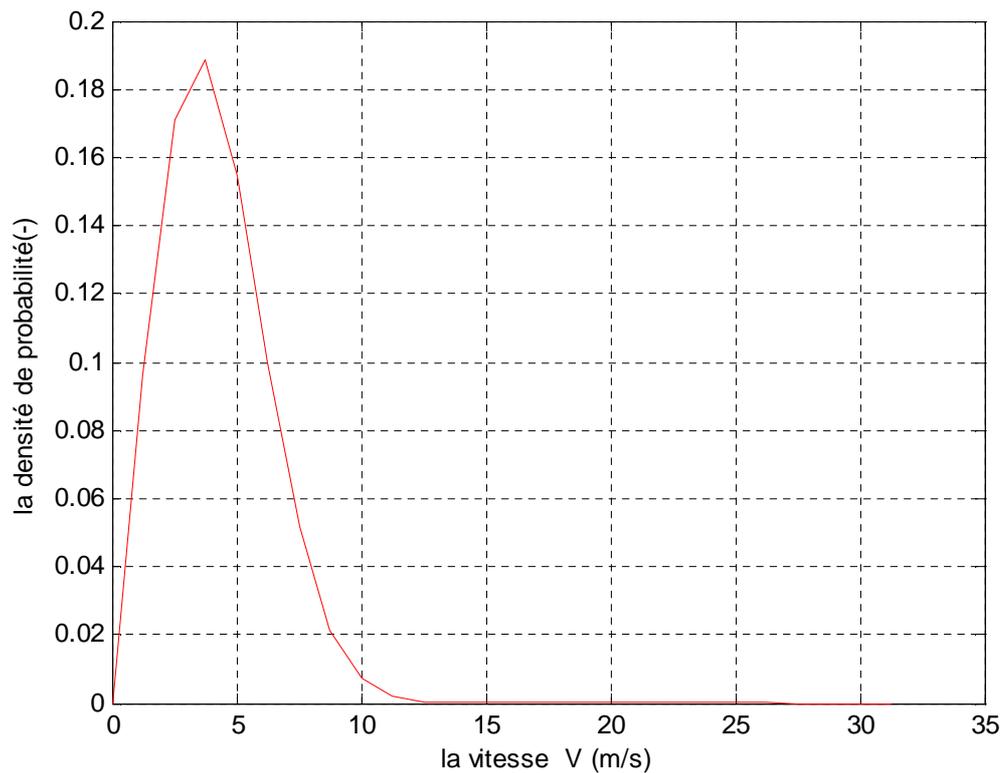
La distribution de Weibull est caractérisée par deux paramètres : [15]

- Le paramètre de forme  $k$  (sans dimensions) qui caractérise la dissymétrie et l'allure de la distribution.
- Le paramètre d'échelle  $C$  (m/s).

La distribution de Weibull à été appliquée au site de Tlemcen (Figure 2-10) :

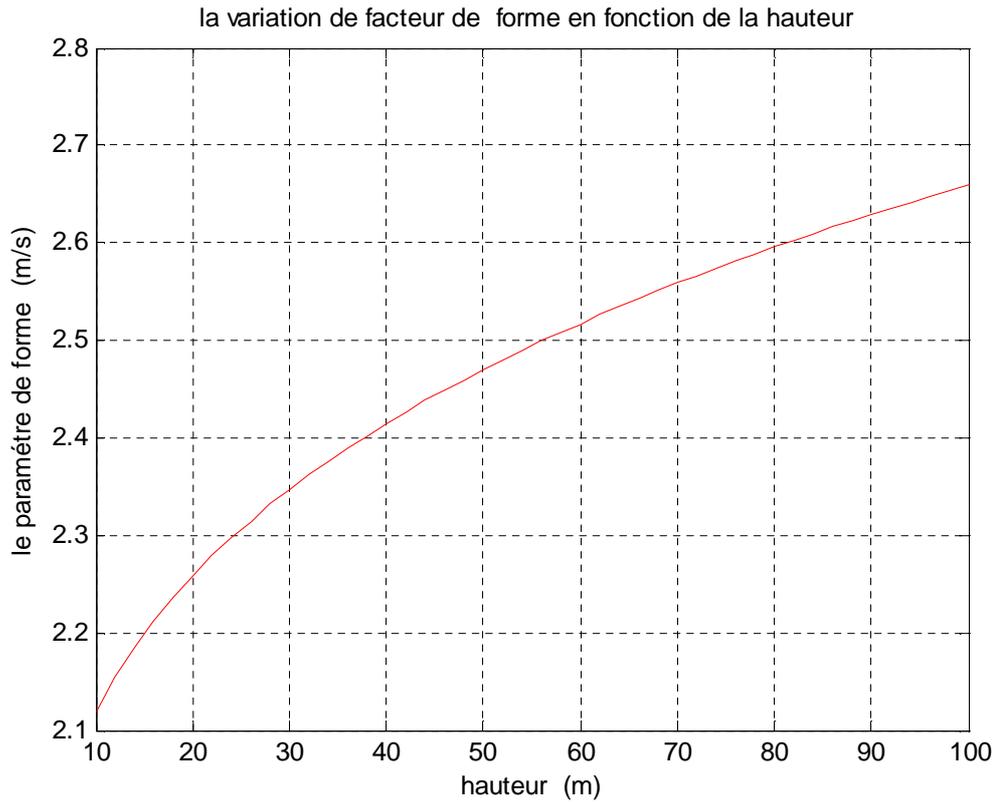
On remarque que la courbe atteint un maximum pour une certaine vitesse, qu'elle décroît au fur et à mesure que la vitesse augmente jusqu'à s'annuler complètement. C'est la représentation de la distribution des fréquences des vitesses moyennes et tri horaires pour une classe donnée de  $k$  et  $C$  des paramètres de Weibull.

Généralement les vitesses sont mesurées auprès des stations de l'ONM [16] (Office National de la Météorologie) à une hauteur de 10 mètres au dessus du sol.



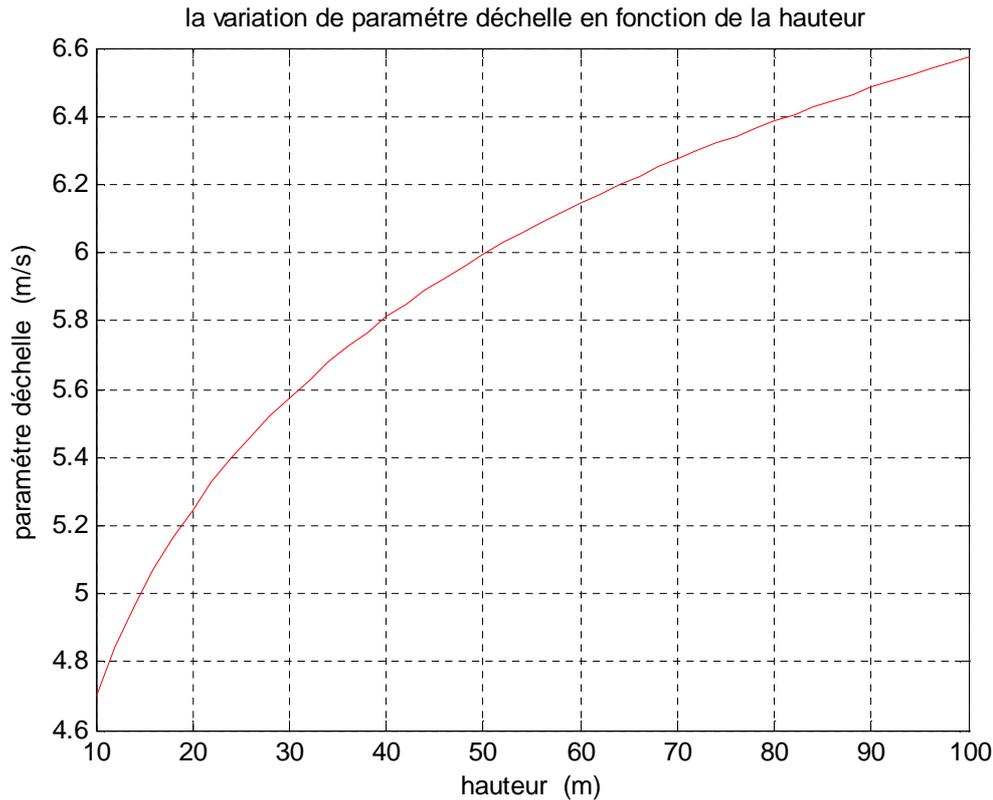
**Fig (2-10) : Distribution de Weibull site de Tlemcen à 10 mètres a.d.s**

Toutefois les aérogénérateur sont tous presque installé à des hauteur supérieures à 10m (typiquement de 12 à 30 m) .Pour cela il est intéressant de connaître la vitesse moyenne du vent à des altitudes plus élevées et extrapoler K et C en utilisant les équations déjà cité avant. L'extrapolation verticale du paramètre de forme  $k$  montre que celui-ci augmente avec la hauteur (Figure 2-11) pour une rugosité de 0.01 mètres ce qui est logique. (D'après l'équation (1-33) ce paramètre n'est fonction que des hauteurs).



**Fig (2-11) : Variation du paramètre  $k$  avec la hauteur**

Par contre l'extrapolation verticale du paramètre d'échelle  $C$  avec la hauteur (la figure (2-12)) montre un changement rapide près du sol où l'effet des frottements au sol se manifeste. Ce dernier est faible pour faible rugosité, et augmente avec rugosité du sol grande.



**Fig (2-12) : Variation du paramètre  $C$  avec la hauteur**

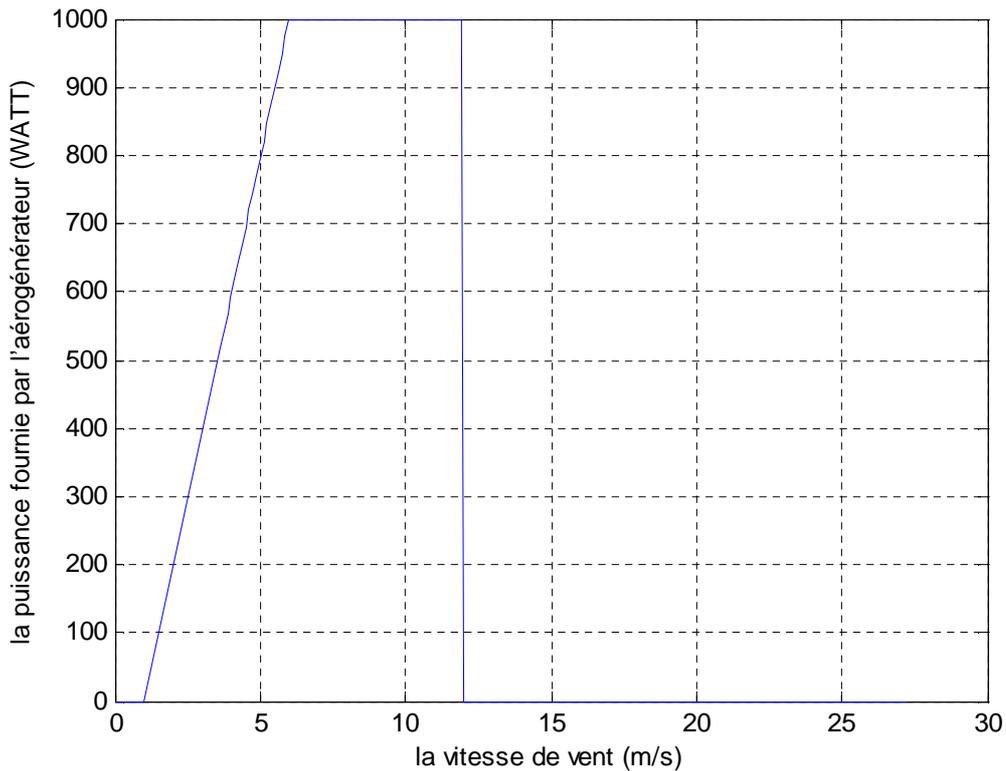
Le tracé de la vitesse moyenne (Figure 2-11 et Tableau 2-4) en fonction de la hauteur (Figure 2-12 et Tableau 2-5) montre que la vitesse moyenne ne cesse d'augmenter avec la hauteur parce que le site de Tlemcen (Aéroport) est un terrain plat et espacé. La vitesse moyenne du vent augmentent sans cesse même au delà de 100 mètres, à l'inverse d'un site montagneux où la vitesse moyenne du vent atteignent un seuil de stabilité rapidement à cause des obstacles.

Site	$K_1$	$C_1$	$V_1$
Tlemcen	2.12	4.70	4.16

**Tableau (2-4) : Caractéristiques du site à 10 mètres a.d.s**

Site	$K_2$	$C_2$	$V_2$
Tlemcen	2.3062	5.4285	4.80

**Tableau (2-5) : Caractéristiques du site à 25 mètres a.d.s**



*Fig (2-13) : Variation de la puissance fournie par l'aérogénérateur en fonction de la vitesse de vent*

## II -4 Modélisation de système de stockage : [17]

Vue la grande diversité de type d'éléments de batterie ainsi le nombre très varié de paramètres qui interviennent, une représentation très empirique du comportement de la batterie peut être établie. Il existe plusieurs modèles de la charge de batterie

Pour notre étude, nous avons utilisé le modèle de Bogdan et Salmeh (1996) qui permet de calculer la capacité de stockage en fonction de la puissance produite par le système hybride éolien –photovoltaïque et la charge demandée

### II -4-1 Modèle de la charge de la batterie :

Quand la puissance de générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps  $t$  peut s'écrire par

$$C_{Bat(t)} = C_{Bat(t-1)} \cdot (1 - \sigma) + (P_{pv}(t) - P_L(t) / \eta_{ond}) \cdot \eta_{Bat} \quad (2-28)$$

$C_{Bat(t)}$  et  $C_{Bat(t-1)}$  sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t) et (t-1) respectivement,  $\sigma$  est le taux horaire de la charge spontanée,  $P_{pv}$  est la puissance de générateur PV,  $P_L$  est la charge demandée au temps t,  $\eta_{ond}$  et  $\eta_{Bat}$  sont les rendements de l'onduleur et de la batterie successivement.

Pendant la charge de la batterie, le rendement est 0.65\_0.85 selon le chargeant courant par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie a été mis égal à 1.

#### II -4-2 Modèle de la décharge de la batterie :

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut être exprimée comme suite.

$$C_{Bat(t)} = C_{Bat(t-1)} \cdot (1 - \sigma) + (P_L(t) / \eta_{inv} - P_{pv}(t)) \quad (2-29)$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est soumise aux contraintes suivantes :

$$C_{Bat\ min} \leq C_{Bat(t)} \leq C_{Bat\ max}$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ( $C_{Bat\ max} = C_{Bat\ min}$ ), et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge (DOD).

$$C_{Bat\ min} = DOD \cdot C_{Bat\ N}$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par la maximum profondeur de décharge,  $SOC_{min} = 1 - DOD$ .

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50%.

#### II -4-3 La tension de la batterie :

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge. ce modèle basé sur le schéma électrique de la figure.

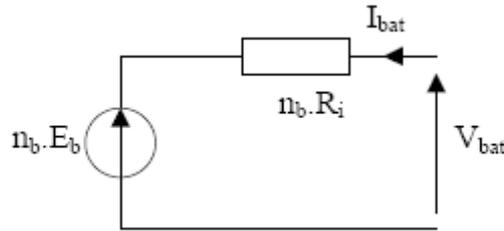


Fig (2-14) : Schéma électrique équivalent de  $n_b$  élément de batterie en série

Pour  $n_b$  batteries en série, nous pouvons écrire l'équation :

$$V_{bat} = n_b \cdot V_{co} + n_b \cdot R_{bat}(t) \cdot I_{bat}(t) \tag{2-30}$$

1

Où  $V_{bat}$  et  $I_{bat}$  sont la tension et le courant batterie au temps  $t$ ,  $R_i$  la résistance interne de batterie.

$$V_{co}(t) = VF + b \cdot \log(SOC(t)).$$

Où VF est la force électromotrice, b est une tension empirique.

Pour une batterie de plomb acide, les paramètres sont regroupés dans le tableau suivant :

Paramètre	Mode de charge	Mode de décharge
VF	13.250 V	12.662 V
b	0.810	0.724

### II -5 Modélisation de l'onduleur [19]:

L'onduleur est un dispositif de conversion, il est important de connaître la relation liant la puissance à la l'onduleur à celle entrante.

Cette caractéristique est représentée par la fonction suivante :

$$\eta_{ond} = f(P_{entrée}) \tag{2-31}$$

$$\eta_{ond} = f(P_{sortie}) \tag{2-32}$$

Ou encore

$$\eta_{ond} = f(P_{taux\ de\ charge})$$

Suivant la relation empirique :

$$\eta_{ond} = a \left( 1 - \exp \left( b \cdot T_{charge} \right) \right) \quad (2-33)$$

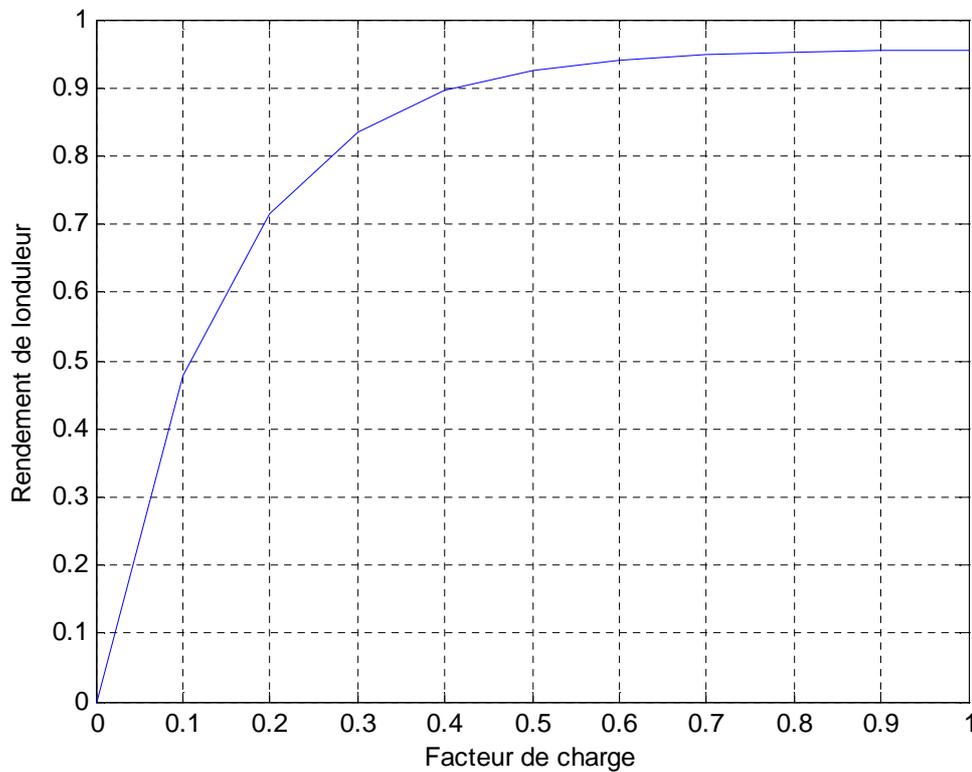
Ou' a, b sont des constantes (a=0.9559 ; b=-6.9164)

$T_{charge}$  : taux de charge donné par :

$$T_{charge} = (P_{sortie} / P_n = P_{charge} / P_n)$$

$P_n$  : la puissance nominale de l'onduleur .

$P_{charge}$  : puissance à la sortie de l'onduleur (puissance de la charge).



**Fig (2-17) Rendement d'un onduleur en fonction de facteur de charge**

# *Bibliographie*

- [1] : S .Bouazza, H .Bouchnafa , « Estimation des énergies incidentes et fournie par module photovoltaïque »Mémoire de DES ,université de Tlemcen ,2001
- [2]:www.21404 .gel.ulaval.ca
- [3]:R .Maouedj « Applications de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah » thèse de magister université de Tlemcen ,2005
- [4]: F Benyarou « conversion des énergies » document de cours (EN01), Université de Tlemcen 2001-2002
- [5] : A Betka « optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil » thèse de magister université de Biskra ,1997
- [6] :N.Benmeddah « Modélisation d'un panneau photovoltaïque » Mémoire de DES, université de Tlemcen ,1999
- [7] :A Rachedi « optimisations d'une Installations photovoltaïque par la conceptions .assistées par ordinateur CAO » thèse de magister université de Tlemcen ,2001
- [8] :K Tahri « exploitation informatisée de l'energie d'un générateur photovoltaïque appliquée aux sites de Tlemcen et Bouzaréah » thèse de magister université de Tlemcen ,2006
- [9] : F Benyarou « conception assistée par ordinateur des système photovoltaïque modélisation, dimensionnement et simulation » thèse de doctorat Université de Tlemcen 2004
- [10] :h . Belghitri « Estimation des énergie reçues par un capteur au fil du soleil » mémoire de fin d'études, université de Tlemcen, 2002
- [11] : Laarej MERAD, Boumédiène BENYOUCEF et Jean Pierre CHARLES Etude technico-économique d'un système hybride (aérogénérateur et moteur diesel) pour la production d'électricité (18) *Afrique SCIENCE 02(2) (2006) 187 – 197* ISSN 1813-548X Mai 2006
- [12] : R. Maouedj1, S. Bousalem2 et B. Benyoucef2 : Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens *Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 (2008) 239 – 250* 239 Juin 2008)
- [13] : L. Khettache «Etude et commande d'un système Eolien à base d'une Machine Electrique Double Alimentée » thèse de magister université de Batna

[14] : HASLETT J., « The capacity credit of wind power : A theoretical analysis », Solar Energy, Vol. 26, pp. 391-401, January 1981.

[15] : LYSEN E.H., « Introduction to Wind Energy », edition S.W.D, 2<sup>ème</sup> edition, the Netherlands, May 1983.

[16] :KASBADJI MERZOUK N., DAAOU H. « Atlas énergétique éolien de l'Algérie

[17] :Olivier GERGAUD « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » thèse de doctorat de l'école normale supérieure de CACHAN, 2002

[18] :A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoudet I. Youm «Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel) Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 (2007) 205 – 214

[19] : BELHADJ Mohamed « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque Autonome »thèse de magister université de Bechar

# *CHAPITRE 3*

*La simulation et  
l'optimisation d'un système  
hybride éolien-photovoltaïque*

## *NOMENCLATURE*

LPS : la probabilité de perte d'énergie (Loss of Power Supply Probability)

EG (t) : L'énergie produite conjointement par l'aérogénérateur et le générateur photovoltaïque

Npv : le nombre de modules photovoltaïques

Epv : l'énergie produite par le générateur photovoltaïque

Ew(t) : l'énergie produite par l'aérogénérateur

Cb (t) : l'énergie stockée dans la batterie à une heure t (Ah)

Cb (t - 1) : l'énergie stockée dans la batterie à l'heure précédente (Ah)

EL (t) : l'énergie demandée par la charge à une heure t (Ah)

LPS: perte d'énergie (Loss of Power Supply \_ 'LPS')

C : est le coût global du système hybride (DA)

A : le coût d'un module photovoltaïque (DA)

b: le coût d'une batterie (DA)

C<sub>0</sub> : le coût total constant incluant les coûts de l'étude, de l'installation, et de l'aérogénérateur (DA)

**III -1 Introduction :**

L'étude de dimensionnement est toujours confrontée par deux critères essentiels qui sont le gisement solaire, le gisement éolien et la demande de l'énergie .Cette gestion d'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle utilisés

Le dimensionnement d'une installation hybride éolien -photovoltaïque revient à déterminer le nombre nécessaire de module pour couvrir les besoins de la charge à tout instant ainsi la capacité de charge de la batterie.

L'objectif de notre travail est de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal de systèmes hybrides (éolien – photovoltaïque). Pour cette raison on présente une méthode de dimensionnement optimal d'un système hybride de production d'électricité alimentant un habitat individuel au site de Tlemcen pour chaque saison.

Pour un niveau de fiabilité fixée, on détermine, par un travail de simulation, les dimensions optimales des différents composants du système, permettant la minimisation du coût.

**III -2 Description de la méthode LPSP**

La méthode de dimensionnement présentée, consiste à déterminer le nombre optimal des batteries et des modules PV selon deux critères d'optimisation à savoir: la fiabilité, qui est basée sur le concept de la probabilité de perte d'énergie (Loss of Power Supply Probability \_ 'LPSP') et sur le coût du système.

La 'LPSP' est définie comme étant la fraction de l'énergie déficitaire sur celle demandée par la charge. Elle exprime le taux de non-satisfaction de la charge.

En terme d'état de charge des batteries, la 'LPSP' est définie par:

$$LPSP = Pr \{C_b (t) \leq C_{b,min} \text{ pour } t \leq T\} \quad (3-1)$$

C'est-à-dire, la probabilité pour que l'état de charge, à tout instant t, soit inférieur ou égal au seuil minimal de l'énergie disponible dans la batterie  $E_{b,min}$ .

L'énergie produite conjointement par l'aérogénérateur et le générateur photovoltaïque en une heure, notée  $EG(t)$ , peut être exprimée par la relation suivante : [9]

$$EG(t) = N_{pv} E_{pv} + E_w(t) \quad (3-2)$$

Avec:  $E_w(t)$  qui est l'énergie produite par l'aérogénérateur,  $E_{pv}(t)$ , l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et  $N_{pv}$  le nombre de modules photovoltaïques.

Quand l'énergie demandée par la charge est supérieure à l'énergie produite, la batterie se décharge pour combler le déficit, dans ce cas précis, l'énergie stockée dans la batterie peut être exprimée par la relation suivante:

$$Cb(t) = Cb(t-1) + \left( \frac{E_L(t)}{\eta_{ond}} - E_G(t) \right) \quad (3-3)$$

Avec:  $\eta_{ond}$  le rendement de l'onduleur; le rendement de charge de la batterie,  $Cb(t)$  l'énergie stockée dans la batterie à une heure  $t$ ,  $Cb(t-1)$  l'énergie stockée dans la batterie à l'heure précédente,  $E_L(t)$  l'énergie demandée par la charge à une heure  $t$ .

Quand l'énergie stockée dans le banc de batteries et celle produite conjointement par les deux sources est insuffisante pour satisfaire la demande pour une heure  $t$ , ce déficit est appelé perte d'énergie (Loss of Power Supply \_ 'LPS'), il est exprimé par:[1] [2]

$$LPS = EL - (EG(t) + Cb(t-1) - Cb_{min})\eta_{ond} \quad (3-4)$$

La probabilité de perte d'énergie 'LPSP' pour une période d'analyse  $T$ , est le rapport de la somme de toutes les valeurs de perte d'énergie  $LPS(t)$  pour la même période sur l'énergie totale demandée. La probabilité de perte d'énergie 'LPSP' est définie par la relation suivante :[1] [2]

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T E_L(t)} \quad (3-5)$$

La méthode de dimensionnement consiste à déterminer le nombre optimal d'accessoires qui correspond à bon fonctionnement du système avec un coût minimal.

Le coût total nécessaire pour la réalisation d'un système hybride est le suivant :

$$C=aN_{pv}+bN_b+C_0 \quad (3-6)$$

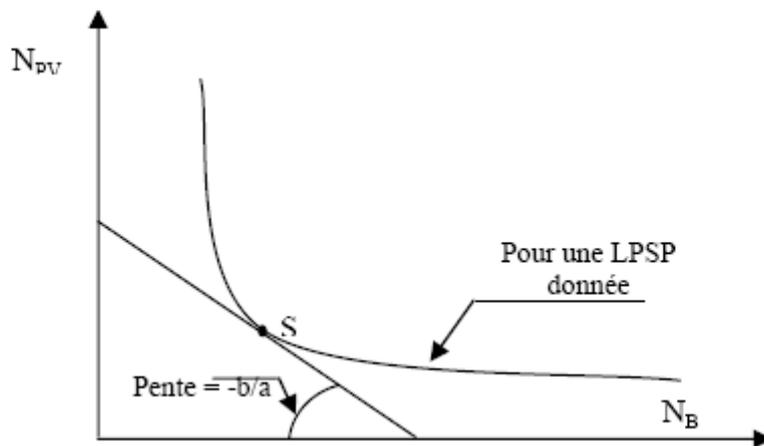
Où C est le coût global du système hybride (DA); a le coût d'un module photovoltaïque (DA); b le coût d'une batterie (DA); C0 le coût total constant incluant les coûts de l'étude, de l'installation, et de l'aérogénérateur.

La solution optimale de la relation (3-6) est donnée par la relation suivante:

$$\frac{\partial N_b}{\partial N_{pv}} = -\frac{b}{a} \quad (3-7)$$

A prés la détermination des différents couple (Npv, Nb), satisfaite une LPSP désire, on constate que le nombre de module est une fonction non linéaire du nombre de batteries.

Cette solution est graphiquement illustrée sur la figure ci-dessous .elle correspond à la pente de tangente à la courbe au point de contact « S ». [3]



**Fig. (3-1) : Tracé du nombre de modules en fonction du nombre de batteries pour une 'LPSP' donnée**

### III -3 Application dans un système hybride éolien- photovoltaïque

Dans cette étape de calcul, nous appliquons notre méthode d'optimisation pour le système hybride éolien- photovoltaïque de production d'électricité destiné à une alimentation domestique.

Nous présentons les différents résultats de calcul des puissance et dimensions optimales de batteries et module PV au site de Tlemcen pour chaque saison.

L'optimisation d'une installation hybride éolien-photovoltaïque nécessite au préalable l'acquisition de certaines données relatives aux équipements existants :

#### a) Les paramètres de module Photovoltaïque :

La tension de circuit ouvert  $V_{CO}=18.5$  volt.

Le courant de court circuit  $I_{CC}=2A$ .

La puissance maximale crête du module  $P_{max}= 28.42W$  .

La tension crête maximale  $V_m=15.15$ .

Le courant maximale crête  $I_m=1.87A$ .

Le coût de module Photovoltaïque : 600\$ équivalant de 60000 DA .

#### b) Les paramètres de la batterie :

La capacité nominale 253(Ah).

Le voltage 12 (V) .

Le minimum de charge 20%.

Le coût de la batterie : 130\$ équivalant de 13000 DA.

#### c) Les paramètres de l'aérogénérateur :

La puissance nominale 1000watt.

La vitesse de démarrage 1 (m/s).

La vitesse de 6 (m/s).

La vitesse de coupure 12 (m/s).

### III -4 Résultats de la simulation :

La méthode de dimensionnement présentée dans ce travail est utilisée pour calculer le nombre de module photovoltaïque et des batteries dans un système hybride de production d'électricité (éolien - photovoltaïque) totalement autonome au site de Tlemcen .Des données horaire de la vitesse du vent mesurer par L'ONM (office National de la Météorologie de Tlemcen)

Le profil de consommation adopté dans cette étude est celui représenté à la figure (3-2) .Cette distribution énergétique horaire est considéré identique pour tous les jours de l'année et correspond au profil de consommation rencontré généralement dans les sites isolés .

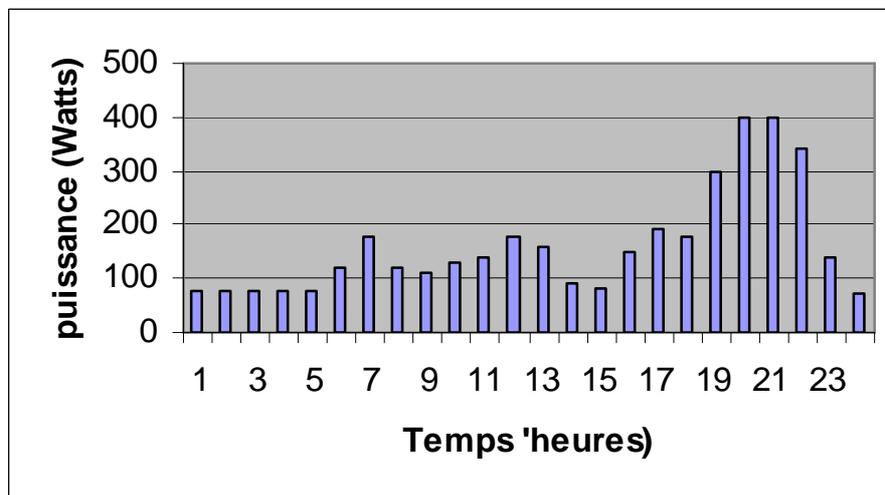


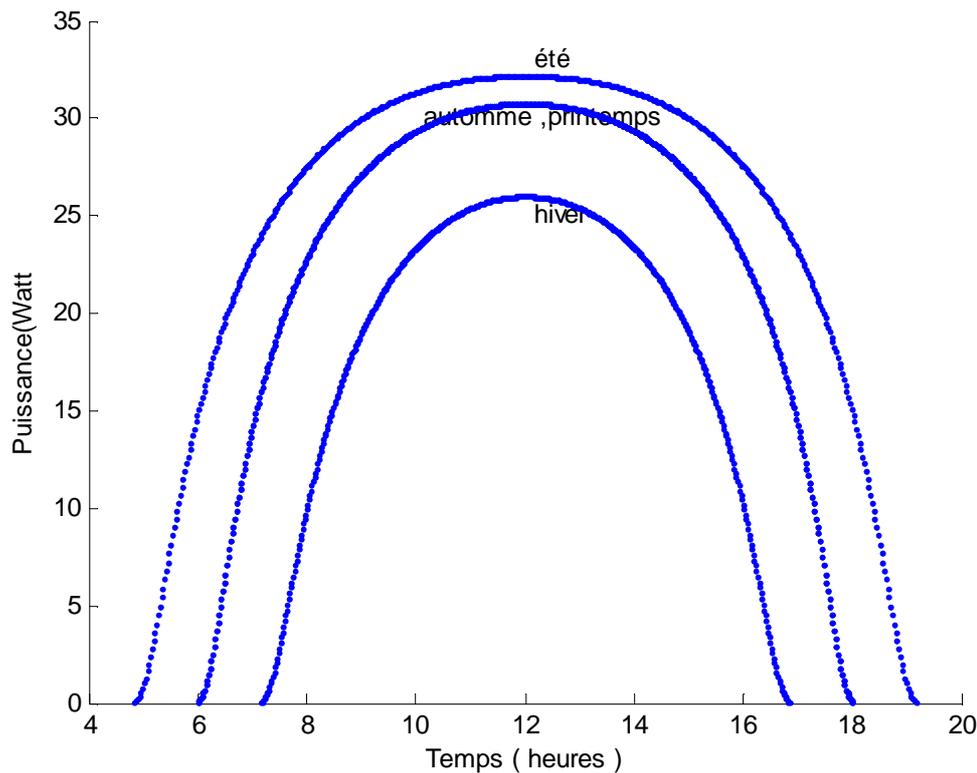
Fig. (3-2) profile de consommation adoptée

La demande en charge de l'habitation est faible dans l'intervalle de [1-5h] et [23-24h] ainsi elle est très importante dans l'intervalle de [19-22h].

La figure (3-3) donne la puissance produite par un seul module photovoltaïque pour les quatre saison, on remarque que les puissance photovoltaïque pour le jour type d'hiver augmente décroît progressivement .elle atteint la puissance maximale 25.98W à 12h.

Dans le jours d'été, on remarque à 12h la puissance est de 32.17W, puis diminue habituellement à la valeur nulle à 19h.

Dans le jours type d'automne et printemps, la puissance PV est de 30.74à 12h, puis diminue habituellement à la valeur nulle à 18h.



**Fig. (3-3) la variation de puissance PV d'un module en fonction de temps pour les quatre saisons**

D'après cette figure, on remarque que les puissances fournies ne sont pas régulières et Réglables à volontés suivant les besoins .Il faut donc un système de stockage.

### III -5 Détermination du couple optimale (Npv, Nb) selon l'approche économique

D'après les résultats de la simulation pour les quatre saisons, on voit qu'il existe un couple optimale qui correspond un coût optimal de l'installation, il se situe dans le cas de la figure (3-4) pour la saison hiver, autour de 34 module, la capacité de stockage alors nécessaire est d'environ 21 KWh (15) batterie. Ce couple exige un coût total de 22180 \$ l'équivalent de 2218000DA.

Les résultat de simulation pour la saison de printemps figure (3-5) montre que le nombre optimale de module et de batterie qui sont assurés la couverture de charge la demandée sont 19 et 5 respectivement avec un coût totale de 12050\$ l'équivalent 1205000DA.

Dans la saison d'été figure (3-6) , les résultats montrent que le nombre de module est de 14 le nombre de batteries Correspondant est de 4, le coût totale de ce couple est de 8920\$ l'équivalent 892000DA.

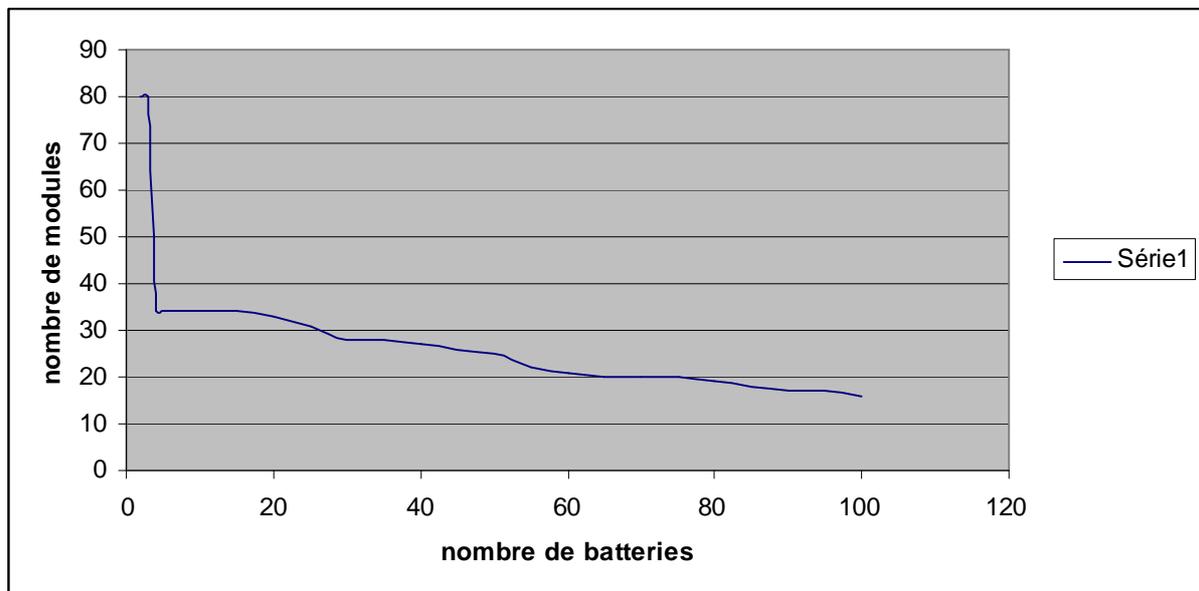
.Les résultats de simulation pour la saison automne figure (3-7) , montre que le couple optimale est de 25 modules et de 10 batteries avec un coût totale de 16300\$ l'équivalent de 163000DA.

Suite au calcul de coût totale de couple optimale, on constate que le coût du système hybride « éolien- photovoltaïque varie proportionnellement .En peut avoir à travers les résultat obtenus ,que le coût du couple optimale est de 22180\$ ,12050\$,8920\$,16300\$ pour les saison hiver, printemps été et automne successivement.

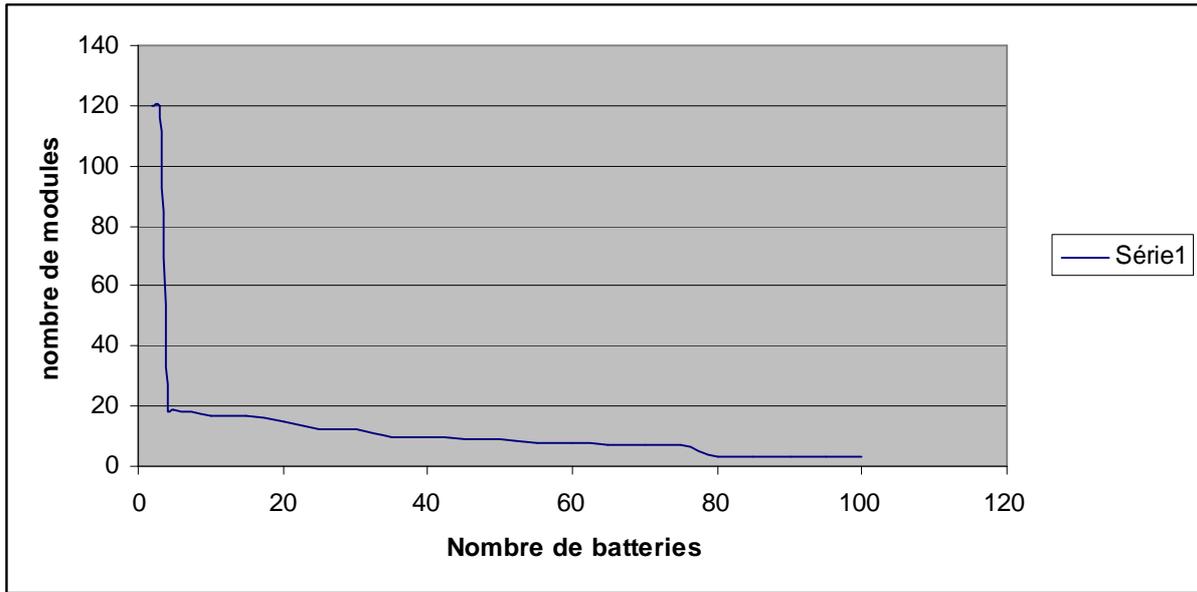
Saison	Npv	Nb	Coût totale (\$)
Hiver	34	15	22180\$
Printemps	19	5	12050\$
Eté	14	4	8920\$
Automne	25	10	16300\$

**Tableau (3-1) : couple optimaux déterminés pour les saison**

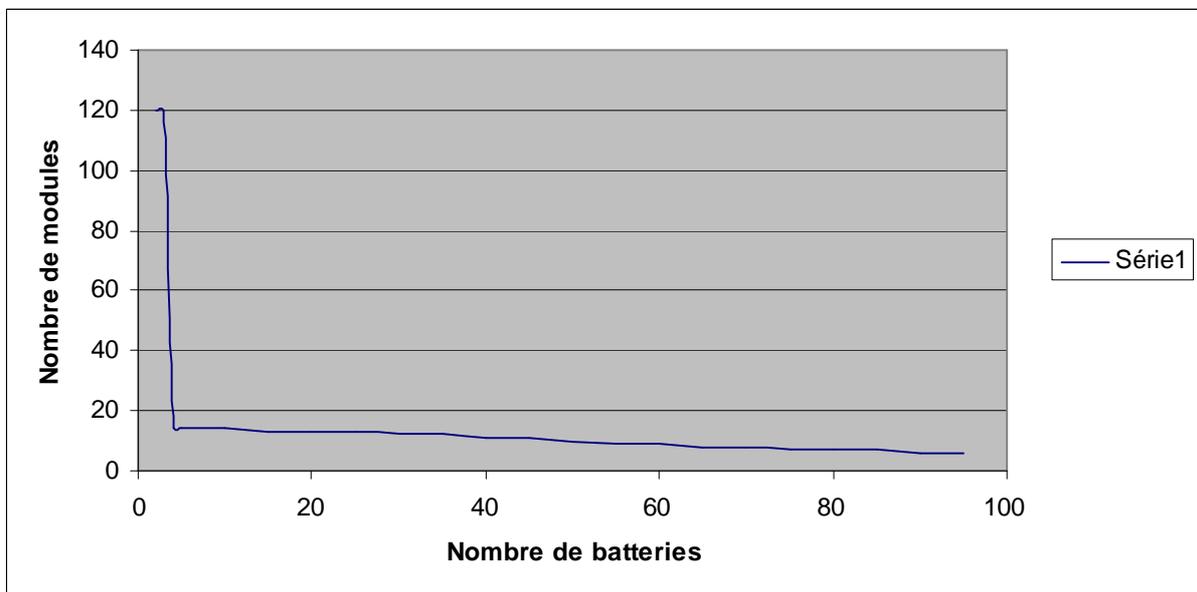
On déduit que la saison d'été donne un coût le moins cher apport les autres saison. A cause du nombre d'insolation



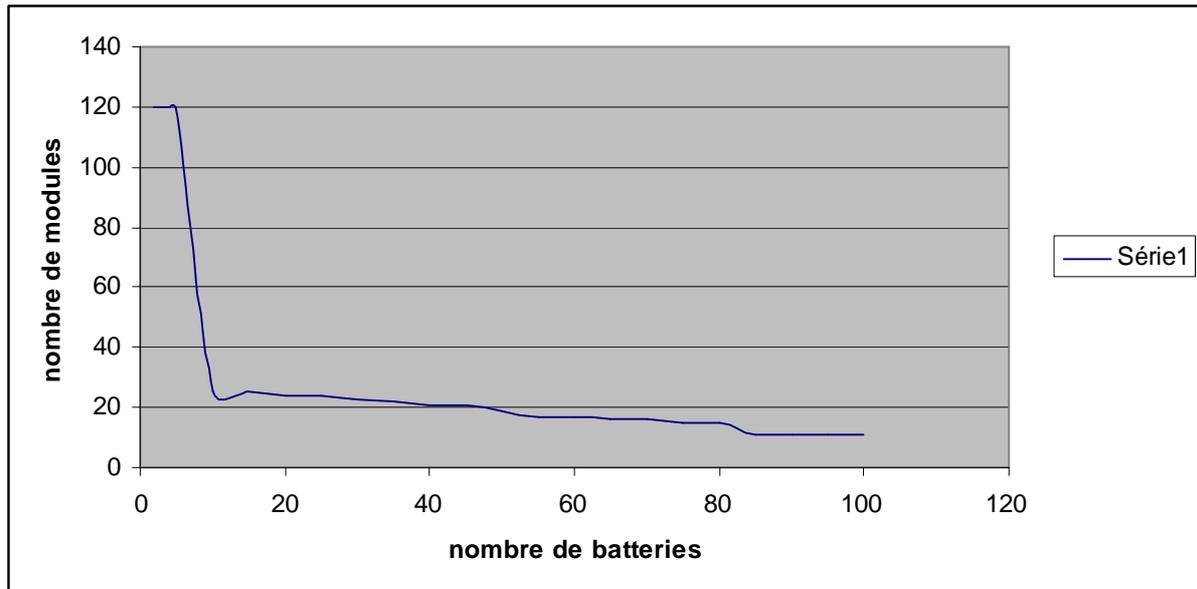
**Fig(3-4) : variation du nombre de modules en fonction du nombre de batteries pour la saison hiver avec la solution optimale pour LPSP=0**



**Fig(3-5) : variation du nombre de modules en fonction du nombre de batteries pour la saison printemps avec la solution optimale pour LPSP=0**



**Fig(3-6) : variation du nombre de modules en fonction du nombre de batteries pour la saison été avec la solution optimale pour LPSP=0**



**Fig(3-7) : variation du nombre de modules en fonction du nombre de batteries pour la saison automne avec la solution optimale pour LPSP=0**

### III -6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode de dimensionnement optimal du générateur photovoltaïque et du banc de batteries dans un système hybride de production d'électricité (éolien -photovoltaïque) totalement autonome. Pour une charge et une probabilité de perte d'énergie données.

Après avoir calculé les puissances horaires produites conjointement par les deux sources d'énergie, et adopté un profil de consommation correspondant à celui rencontré généralement dans les sites isolés, on a élaboré un programme de simulation à pas de temps horaire, qui consiste à calculer pour les différents couples (Nb,Npv) choisis, leurs 'LPSP' donnée et sous le critère d'un prix minimum du système, un nombre optimal de batteries et de modules Photovoltaïques a été calculé.

D'après les résultat de simulation ,pour LPSP égale à 0,et un profile de charge demandée ,plus un rendement de batteries de 85% avec un profondeur de décharge de 80% et un rendement de convertisseur de 92%Nnous avons trouvé que ,le couple optimal (Module Batterie) pour

couvrir les besoins de la charge est de ( 34,15) ( 19 ,5) ( 14 , 4) (25 , 10) pour les saison hiver,printemps été et automne successivement .

La détermination optimale de batteries et modules photovoltaïque dépend du site choisi, profile de charge et aussi du rendement des composants du système hybride éolien - photovoltaïque.

# *BIBLIOGRAPHIE*

[1]: H.X.Yong,L,U,J.Burnett, «Weather data and probability analysis of hybrid PV wind power generation systems in Hong Kong » Renewable energie 28(2003):1813-1824

[2]: S. Diaf, D. Diaf., M. Belhamel, M. Haddadi , A. Louche « A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system » Energie Policy (2007) doi 10.1016/j.enpol.2007.06.020.

[3] :the Bogdan,SB,Salameh,ZM ,1996 «Methodology for optimally the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system » IEEE transaction on Energie conversion 11(2),367-375

*Conclusion  
Générale*

## Conclusion générale

La ressource globale en énergie éolienne et photovoltaïque est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité au niveau mondial.

Les travaux présentés dans cette thèse concernent la production d'électricité à partir d'un système hybride (éolien- photovoltaïque) avec un système de stockage totalement autonome.

L'objectif était de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal de systèmes hybrides (éolien – photovoltaïque) pour une charge et une probabilité de perte d'énergie donnée sous le critère d'un prix minimum du système.

Un nombre optimale de batterie et de modules photovoltaïque a été calculé après avoir calculé la puissance horaire produite par l'aérogénérateur et par le générateur photovoltaïque pour une période d'analyse d'une année au site de Tlemcen.

La production d'électricité par le système hybride (éolien- photovoltaïque) avec un système de stockage répond bien au problème posé par le contexte énergétique actuel.

En Algérie, la nature du terrain et la durée de l'ensoleillement lui a permis d'être un des pays modèle dans la production d'énergies renouvelables.

La formulation d'une méthode d'optimisation a permis de calculer pour les différents couples  $(N_B, N_{PV})$  avec un LPSP donnée.

En premier temps, nous avons étudié le principe et l'influence de chaque composant constituant le système PV et l'aérogénérateur éolienne.

Dans la partie de la modélisation on a présenté la modélisation de chaque composante de système hybride éolien- photovoltaïque avec soin.

Dans la dernière partie nous avons développé un programme de simulation qui nous a permis de trouver le couple  $(N_B, N_{PV})$  pour une LPSP donnée et un coût minimale pour chaque saison

D'après les résultats de la simulation pour les quatre saisons, on voit qu'il existe un couple optimale qui correspond un coût optimal de l'installation, il se situe pour la saison hiver, autour de 34 module, la capacité de stockage alors nécessaire est d'environ 21 KWh (15) batterie.

Pour la saison de le nombre optimale de module et de batterie qui sont assurés la couverture de charge la demandée sont 19 et 5 respectivement

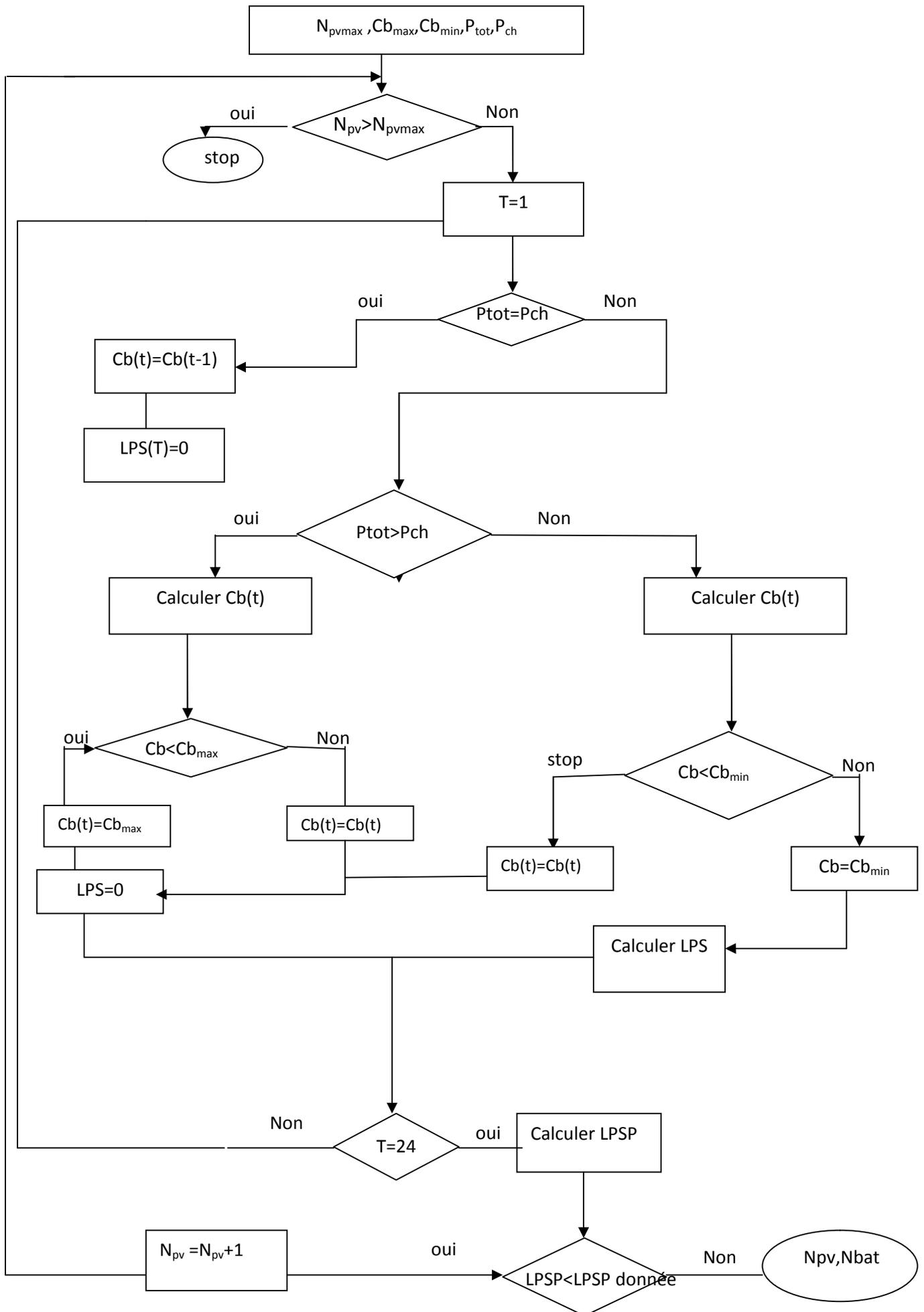
Dans la saison d'été les résultats montrent que le nombre de module est de 14 et le nombre de batteries Correspondant est de 4.

Les résultats de simulation pour la saison automne montrent que le couple optimale est de 25 modules et de 10 batteries

Les résultats de simulation et d'optimisation que nous avons obtenue montre que la méthode choisie donne des bonnes estimations

Pour contribuer à la solution aux problèmes d'énergie, il est intéressant de développer des sources décentralisées de ces énergie .dans la recherche de telles solution, le système hybride développé pourra constituer un moyen très économique pour l'énergie d'électrification rurale

# *ANNEXE*



## RÉSUMÉ

L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés.

L'Algérie à fournit un grand effort pour l'électrification rurale et saharienne .En effet, le taux d'électrification national pour l'année 2001 est de 96%. Malgré le taux élevé, il existe toujours des foyers épars qui leurs électrifications par l'extension du réseau conventionnel est très coûteuse. Le système hybride de production d'électricité (éolien - photovoltaïque) totalement autonome est la solution idéale pour ce genre de problème.

Nous présentons dans ce papier, une méthode de dimensionnement optimal du générateur photovoltaïque et du banc de batteries dans un système hybride de production d'électricité (éolien - photovoltaïque) totalement autonome.

Pour une charge et une probabilité de perte d'énergie données sous le critère d'un prix minimum du système, un nombre optimal de batteries et de modules photovoltaïques a été calculé.

Pour cela nous avons développé un programme de simulation à l'aide de logiciel MATLAB qui nous a permis de trouver le couple ( $N_B$ ,  $N_{PV}$ ) pour une LPSP donnée et un coût minimale pour chaque saison

### Mots clés :

Système hybride (éolien- photovoltaïque) - Optimisation - Méthode de la LPSP - Banc de batteries.

## ABSTRACT

The exploitation of renewable resources has been a great rise in industrialized countries and even in some underdeveloped countries.

Algeria is in a great effort to provide rural electrification and Saharan Africa. Indeed, the national electrification rate for the year 2001 is 96%. Despite the high rate, there are still scattered to their homes electrification through the extension of the conventional network is very expensive. The hybrid power generation (wind - PV) is completely autonomous solution for this problem.

We present in this paper, a method for optimal sizing of the PV generator and battery bank in a hybrid power generation (wind - PV) completely autonomous. For a load and a probability of energy loss data under the criterion of a minimum price system, an optimal number of batteries and modules have been calculated.

For this we have developed a simulation program using MATLAB software which allowed us to find the pair ( $N_B$ ,  $N_{PV}$ ) for a given LPSP and a minimum cost for each season

### Keywords:

Hybrid system (wind-PV) - Optimization - Method LPSP - Banc of batteries.

## ملخص

إن استعمال الموارد المتجددة عرف تطورا كبيرا في البلدان المصنعة وأيضا في بعض الدول السائرة في طريق النمو. وفرت الجزائر جهدا كبيرا للكهرباء القروية والصحراوية. و بالفعل، النسبة الوطنية لسنة 2001 هي 96%. وبالرغم من هذه النسبة المرتفعة، يوجد دائما بؤر متعثرة وبالتالي تكون كهربتها بتمديد الشبكة مكلفة جدا.

النظام الهجين للإنتاج الكهرباء (ريحي- كهر وشمسي) يكون بالكامل ذاتيا ويكون هو الحل المثالي لهذا النوع من المشاكل.

نقدم في هذا البحث، التعبيد المثالي للمولد الكهروشمسي ومجموعة من البطاريات في النظام الهجين لإنتاج الكهرباء (ريحي- كهر وشمسي) ذاتيا كليا.

من أجل الشحن واحتمال فقدان الطاقة المعلومتين ومن أجل أدنى ثمن لهذا النظام، قد تم حساب العدد المثالي للبطاريات والألواح الكهروشمسية.

من أجل هذا السبب طورنا برنامجا للمحاكاة وذلك بالاعتماد على برنامج مطلب الذي يسمح لنا بحساب الثنائية (عدد الألواح، عدد البطاريات) من أجل احتمال فقدان الطاقة المعلوم ومن أجل أدنى ثمن لكل فصل.

**المصطلحات:**النظام الهجين (ريحي- كهر وشمسي) - التعبيد المثالي-احتمال فقدان الطاقة- مجموعة البطاريات.