

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Batna

Faculté des Sciences de l'Ingénieur



MEMOIRE

Département d'Electrotechnique

Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques

LSP-IE Batna

Pour l'Obtention du Titre de

Magistère en Electrotechnique

Option : Maîtrise des Energies

Présenté par :

Ameziane Sadek

Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Université de Batna

Thème

Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien

Soutenu le 01/07/2009, devant le Jury

Boubakeur AZOUI	Prof	Université de Batna	Président
Said DRID	M.C	Université de Batna	Rapporteur
Nacerddine NAIT-SAID	Prof	Université de Batna	Co-Rapporteur
Achour BETKA	M.C	Université de Biskra	Examineur
Djamel RAHEM	M.C	Centre Universitaire d'Oum-El-Bouaghi	Examineur
Abdeselem MAKOUF	Prof	Université de Batna	invité

Remerciement

Les travaux réalisés dans ce mémoire ont été effectués au sein du laboratoire de recherche de l'université de Batna 'laboratoire des systèmes propulsion-induction Electromagnétiques (LSP-IE Batna)'.

C'est un agréable plaisir pour moi d'expliquer mes remerciements à Monsieur **Said DRID**, Maître de conférence à l'université de Batna qui, en acceptant d'être rapporteur de ce mémoire, de diriger les différents travaux effectués m'a fait profiter de ses conseils judicieux et sa grande patience.

Je suis également profondément reconnaissant envers Monsieur **Nacerddine NAIT-SAID** (co-rapporteur), Professeurs à l'université de Batna, Pour ses qualités humaines et de m'avoir supporté.

Je remercie Monsieur **Boubakeur AZOUI**, Professeurs à l'université de Batna, d'avoir accepté de présider mon jury de thèse. Je suis particulièrement sensible au grand honneur qu'il m'a accordé en acceptant cette tâche.

Mes vifs remerciements vont également aux Messieurs :

- Monsieur **Achour BETKA**, Maître de conférence à l'université de Biskra.
- Monsieur **Djamel RAHEM**, Maître de conférence au Centre Universitaire d'Oum-El-Bouaghi.

Pour avoir accepté d'examiner ce travail.

En fin, je remercie Monsieur **Abdesselem MAKOUF** Professeurs à l'université de Batna, pour avoir accepté notre invitation afin d'exprimer son point de vue sur le contenu de ce mémoire.

Je ne peut pas clore mes remerciements, sans rendre hommage au tout puissant allah, à mes parents, mes proches et tout les personnes qui mon aidé pour atteindre ce niveau.

Que DIEU guide nos pas dans la voie du savoir, de la vérité et de la justice.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

.....1

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS, LES SYSTEMES SOLAIRES ET LES SYSTEMES HYBRIDES :

1.1 Introduction.....4

1.2 Généralités sur les systèmes éoliens

1.2.1 définition du système éolien.....4

1.2.2 Les différents types d'un système éolien.....5

1.2.3 Les principaux composants d'un systèmes éolien à axe horizontal.....6

1.2.4 Le principe de fonctionnement d'un système éolien à axe horizontal.....8

1.2.5 Types d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens10

1.2.6 Les différentes classes d'un système éolien à axe horizontal.....12

1.2.6 Utilisation des systèmes éoliens.....13

1.3. Généralités sur les systèmes solaires

1.3.1 Définition du système solaire.....14

1.3.2 Les différents types d'un système solaire.....14

1.3.3 Les principaux composants d'un système solaire photovoltaïque.....14

1.3.4 Le principe de fonctionnement d'un système solaire photovoltaïque.....17

1.3.5 Classification d'un système solaire photovoltaïque.....18

1.3.6 Utilisation des systèmes solaires.....19

1.4. Généralités sur les systèmes hybrides

1.4.1 Le système hybride éolien-générateur à combustible20

1.4.2 Le système hybride éolien-pile à combustible20

1.4.3 Le système hybride solaire-générateur à combustible21

1.4.4 Le système hybride solaire-pile à combustible21

1.5. Conclusion.....	21
-----------------------------	-----------

CHAPITRE 2 : LE SYSTEME EOLIEN A AXE HORIZONTAL A VITESSE VARIABLE

2.1 Introduction.....	23
2.2 Définition et principe de fonctionnement du système éolien à axe horizontal à vitesse variable.....	24
2.3 Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal à vitesse variable	
2.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine à axe horizontal.....	25
2.3.2 Modélisation de la turbine.....	27
2.3.3 Modèle du multiplicateur.....	28
2.3.4 Modélisation de l'arbre de la turbine.....	28
2.4 Les différents types d'mppt éolien	
2.4.1 Maximisation de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure.....	31
2.4.2 Maximisation de la puissance avec la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure.....	31
2.5. Modélisation et implantation d'un simulateur éolien	34
2.6. Conclusion.....	39

CHAPITRE 3 : LE SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE SANS BATTERIE

3.1.Introduction.....	40
3.2. Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque	
3.2.1 La caractéristique courant-tension	41
3.2.2 Paramètres externes d'une cellule solaire photovoltaïque.....	42
3.2.3 Influence des résistances série et shunt.....	44
3. 2.4 Influence de l'éclairement.....	45
3.2.5 Influence de la température.....	46
3.3. Le générateur solaire photovoltaïque.....	46
3.4. Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque	
4.1 Modélisation d'une cellule solaire photovoltaïque.....	48

4.2 Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque.....	50
3.5. Définition et principe de fonctionnement de l'mppt d'un système solaire photovoltaïque	51
3.6. Les différents types d'mppt solaire photovoltaïque	
3.6.1 Les mppt classifiés selon les paramètres d'entrés.....	53
3.6.2 Les mppt classifiés selon le type de recherche ou contrôle.....	55
3.7. Modélisation et implantation d'un simulateur solaire photovoltaïque.....	55
3.8. Conclusion.....	56

CHAPITRE 4 : L' MPPT D'UN SYSTEME DE GENERATION HYBRIDE SOLAIRE-EOLIEN :

PRINCIPE ET IMPLANTATION :

4.1. Introduction.....	57
4.2. Description du banc d'essai	57
4.3. Les convertisseurs utilisés	
4.3.1 Essai d'un hacheur parallèle	59
4.3.2 Essai d'un hacheur série	59
4.3.3 Essai d'un hacheur série-parallèle	60
4.4. L'MPPT du système solaire proposé	
4.4.1 L'MPPT à tension de référence	60
4.4.2 L'Mppt avec un régulateur itératif	63
4.5 L'MPPT du système éolien proposé.....	65
4.6 L'MPPT d'un système de génération hybride solaire-éolien	
4.6.1 L'MPPT d'un système de génération hybride solaire-éolien parallèle	69
4.6.2 L'MPPT d'un système de génération hybride solaire-éolien série	70
4.7. Interprétation des résultats expérimentaux obtenus.....	71
4.8. Conclusion	72
<u>CONCLUSION GENERALE.....</u>	73
<u>ANNEXE1.....</u>	76
<u>ANNEXE2.....</u>	81

INTRODUCTION GENERALE

Il est clair que l'énergie électrique permet un véritable confort et une des causes du développement d'un pays. Il est clair que sans ressources énergétiques viables, un pays aura d'autant plus de mal à se développer. Toutefois, cela révèle un autre problème : Pour faciliter leur développement, certains pays font appel à des sources d'énergie polluantes tandis que d'autres plus développés souhaitent favoriser le développements de ressources moins polluantes. Ainsi, alors que les énergies prédominantes sont le pétrole et le nucléaire, la recherche tant publique que privée se tourne vers des énergies plus renouvelables. D'ailleurs, même si ces recherches peuvent paraître du point de vue leur progression industrielle dérisoires, elles n'en restent pas moins primordiales.

De la même façon que le vent actionnait les pales des moulins à eau ou à blé, le vent peut actionner les pales d'une hélice et ainsi entraîner un système équivalent à une dynamo appelée aérogénérateur [Guy.C]. L'ensemble « pales + aérogénérateur » est plus particulièrement appelé « éolienne » (du grec Eole, dieu du vent) ou système éolien et correspond à une haute tour (le vent soufflant davantage en hauteur) en béton ou en métal, au sommet de laquelle tourne une hélice (généralement de 30 à 40 mètres de diamètre) comportant trois pales. D'ailleurs, le diamètre de l'hélice se doit d'être important du fait que la puissance théorique d'une éolienne croît proportionnellement au carré du diamètre des pales et au cube de la vitesse du vent [Fré.P]. Aussi, l'électricité éolienne est l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses et pour cause puisqu'elle est également la moins coûteuse des énergies renouvelables. Toutefois, tous les sites ne peuvent pas forcément inclure des éoliennes du fait que la vitesse moyenne du vent doit dépasser les 5 mètres par seconde soit 18 km par heure. De nos jours, les machines les plus courantes ont une puissance de 750 kW et les plus puissantes commercialisées atteignent 1,5 MW [Sal.E].

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

Soleil peut tout simplement permettre le chauffage de liquide de différentes compositions contenues dans des systèmes permettant aussi une circulation de ce fluide à l'intérieur même d'éléments domestiques tels que le chauffe-eau ou le plancher ce qui permet un chauffage uniforme dans toute la maison. Néanmoins, un tel chauffage n'est pas d'utilisation très répandue du fait qu'il dépend très fortement de l'ensoleillement en journée ce qui induit la présence d'une énergie en parallèle pour répondre au besoin de chauffage à toutes les saisons. Lorsque les photons (particules de lumière) frappent certains matériaux, ils délogent et mettent en mouvement des électrons, provoquant ainsi un courant électrique. Les cellules solaires (ou photopiles) sont constituées de silicium, qui est un élément très répandu dans la nature (28 % de l'écorce terrestre), sous sa forme oxydée (silice). Aussi, pour obtenir la tension désirée (en volts), on monte de nombreuses cellules en série dans des panneaux rectangulaires dits 'modules photovoltaïques', eux-mêmes mis en série. Pour obtenir la puissance souhaitée (en kilowatts), on installe des séries en parallèle. D'autre part, le photovoltaïque est un domaine scientifique encore récent, doté d'un fort potentiel d'amélioration, en particulier en matière de rendement de conversion des cellules et les coûts de fabrication ne cessent de diminuer. Ainsi, l'utilisation de telles cellules pour produire de l'électricité reste du niveau de l'innovation mais des solutions alternatives font l'objet d'étude ou sont pour certaines déjà exploitées. Par exemple, il a été construit des centrales solaires constituées de miroirs afin de concentrer les rayons solaires en un point au niveau duquel est placée de l'eau qui va donc chauffer, permettre la production de vapeur et donc la rotation d'une turbine [Lau.B]. Un autre projet (Projet d'une héliocentrale orbitale (Nasa)) consiste en une centrale solaire « spatiale » d'une puissance entre 5000 et 10 000 MW et d'un coût estimé à 60 milliards de dollars. Le rayonnement solaire serait recueilli par deux panneaux photovoltaïques de 3 km ´ 5 km, fournissant une tension continue de 20 000 volts. L'énergie serait elle transmise [F.Cos] à la terre par pinceau d'ondes, le terminal terrestre étant une antenne de 10 km.

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

Objectif mémoire

L'objectif de ce présent mémoire est l'implantation expérimentale d'un MPPT qui signifie : maximisation de la puissance extraite, pour un système de génération hybride solaire photovoltaïque et éolien à axe horizontal.

Structure du mémoire

Notre mémoire est réparti en quatre chapitres, chacun dispose d'un but bien déterminé.

- Le premier chapitre consiste à donner une aide générale sur les systèmes éoliens à axe horizontal et solaires photovoltaïque et ceux hybrides.
- Le deuxième chapitre a pour objectif de modéliser le système éolien à axe horizontal à vitesse variable et l'implantation pratique.
- Le troisième chapitre sera consacré à modéliser le système solaire photovoltaïque et son implantation expérimentale.
- Le quatrième chapitre est dédié à l'implantation de l'MPPT du système hybride éolien-solaire.

CHAPITRE 1:

GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS, LES

SYSTEMES SOLAIRES ET LES SYSTEMES HYBRIDES

1.1 Introduction :

Parmi les systèmes qui fonctionnent avec les énergies renouvelables, on mentionne les systèmes éoliens fonctionnant avec l'énergie du vent et les systèmes solaires fonctionnant avec l'énergie solaire. Plusieurs technologies des systèmes solaires et éoliens sont envisageables, mais les plus intéressants ce sont ceux éoliens à axe horizontal et solaires photovoltaïque.

Dans ce premier chapitre, on va essayé de donner un aperçu général sur les systèmes solaires et les systèmes éoliens ; et précisément sur les systèmes solaire photovoltaïques plus les systèmes éoliens à axe horizontal qui représentent l'actualité des énergie renouvelables. On va essayer aussi de donner quelques architectures des systèmes hybrides.

1.2 Généralités sur les systèmes éoliens :

1.2.1 Définition du système éolien :

Un système éolien ou avec un autre terme un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique [Fré.P]. La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines [Vin.R].

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire [Sal.E].

1.2.2 Les différents types d'un système éolien :

Il existe deux différents types de systèmes éoliens selon l'orientation de leurs axes de rotation par rapport à la direction du vent [M.Iva] :

* **Le système à axe vertical :** Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité car elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [M.Iva]. Les structures les plus répandues dans le stade de l'industrialisation sont [Fré.P] :

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi cylindres qui augmente le couple moteur.
- Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure est la plus répandue sont celles de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

* **Le système à axe horizontal :** Les éoliennes à axe horizontal [Fré.P] sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi-critères.

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Quant aux éoliennes à marche rapide, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente, elles sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique (figure (1.1)).

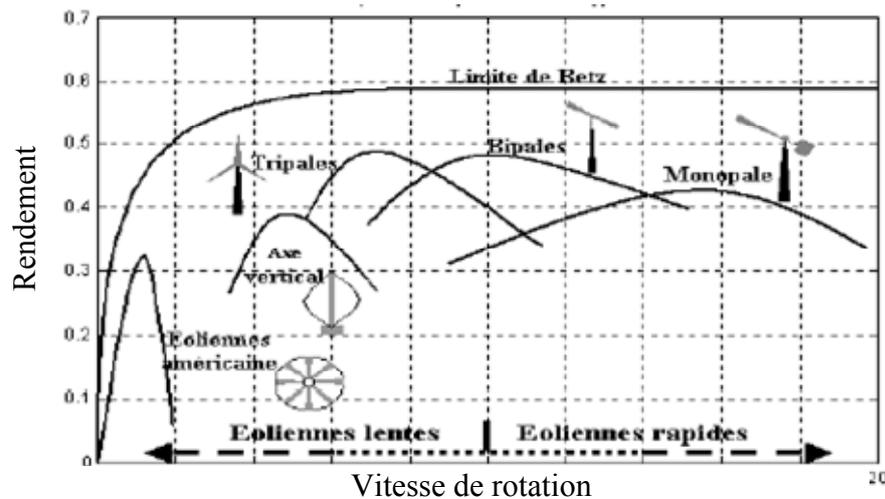


Figure (1.1) Le rendement des différentes éoliennes

1.2.3 Les principaux composants d'un système éolien :

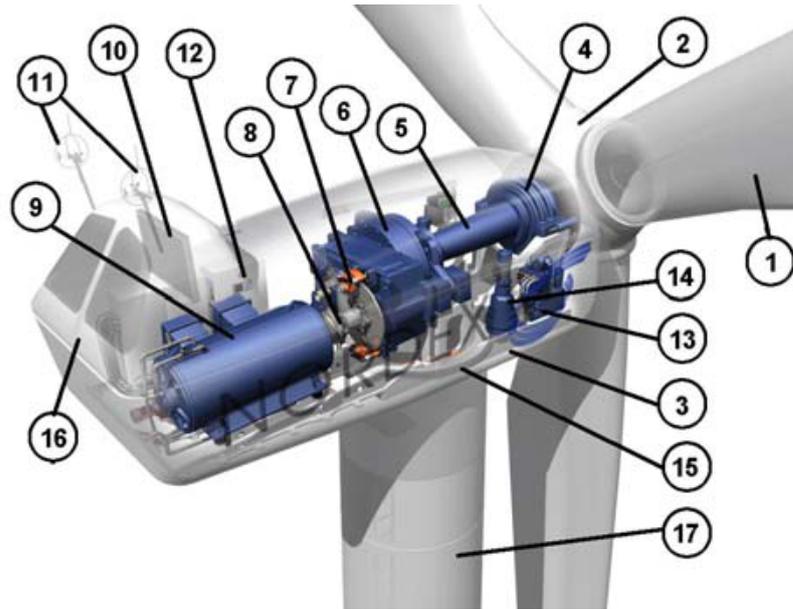
Comme mentionné précédemment, il existe deux types de systèmes éoliens : les systèmes à axe vertical et ceux à axe horizontal, mais dans ce mémoire on s'intéressera qu'à ceux à axe horizontal.

Une éolienne "classique" est généralement constituée de quatre éléments principaux [L.Cha]:

- La turbine, qui représente l'outil principal pour la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est généralement constituée de :
 - a) Mat : un tube d'acier à la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle [Sal.E, Muk.R]. Le mat doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La quantité de matière mise en oeuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [Fré.P].

- b) Nacelle (supportée par le mat) : est une carcasse qui regroupe plusieurs éléments (générateur, arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de refroidissement, système de control, ...).
 - c) Rotor (supporté par la nacelle) : Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. A trois pales, le rotor tripale (concept Danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [Fré.P]. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [Fré.P].
- Le système électromécanique (intégré dans la nacelle), qui transforme l'énergie mécanique transmise par la turbine en énergie électrique et qui regroupe une génératrice électrique avec son environnement (génératrice asynchrone à cage, MADA, génératrice synchrone, batteries de condensateurs, multiplicateur, tension à courant continu, ...etc.) plus le système de commande (contrôle) en cas de besoin (redresseur, onduleur, capteur, système de sécurité électrique, ...etc.).
 - Le système d'interconnexion, qui relie le système électromécanique (producteur d'électricité) au consommateur d'électricité. C'est un système simple (câbles seulement) en cas d'une énergie mécanique stable ; ou composé (redresseur, onduleur, système de control....) en cas d'une énergie mécanique instable.
 - Le système de contrôle (utilisé généralement pour les systèmes éoliens de grande puissance), comportant un dispositif qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation et essaye aussi de la mettre fonctionner à ces puissances maximales. En cas de défaillance (par exemple surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice, ...etc.), le système arrête automatiquement l'éolienne.

Un exemple d'éolienne à axe horizontal est montré en figure (1.2).



1: pales, 2: moyeu rotor, 3: nacelle, 4: cardan, 5: transmission, 6: multiplicateur de vitesse, 7: frein à disque, 8: accouplement, 9: génératrice, 10: radiateur de refroidissement, 11: centrale de mesures du vent, 12: contrôle, 13: centrale hydraulique, 14: mécanisme d'orientation face au vent, 15: paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, 16: capot, 17: mât.

Figure (1.2) : Exemple de constituants d'un système éolien à axe horizontal (Schéma d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW)) [B.Mul].

1.2.4 La théorie de Betz :

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert Betz, qui suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant. Soit V' la vitesse au travers de S , la section balayée par les pales de l'éolienne (comme présenté à la figure (1.3)) et M la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation de l'énergie cinétique ΔE_c est :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.1)$$

La puissance aérodynamique de l'éolienne P_{aer} s'écrit alors :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.2)$$

avec, ρ la densité volumique de l'air.

Par ailleurs, la force de l'air (F) sur l'éolienne est donnée par:

$$F = \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.3)$$

d'où :

$$P_{aer} = F.V' = \rho.S.V'^2.(V_1 - V_2) \quad (1.4)$$

En identifiant les équations (1.2) et (1.4), il vient :

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (1.5)$$

et donc :

$$P_{aer} = \frac{1}{4}.\rho.S.(V_1^2 - V_2^2).(V_1 + V_2) \quad (1.6)$$

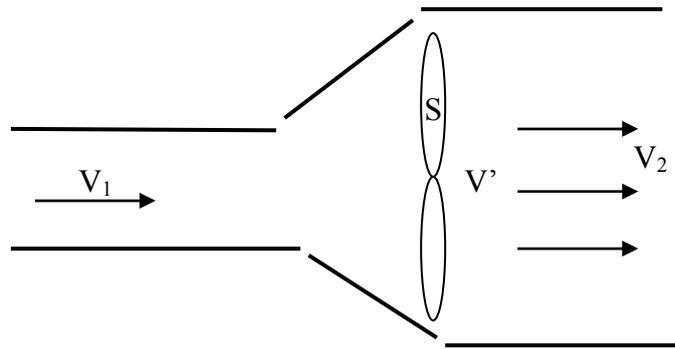


Figure 1.3 Théorie de Betz : Schéma de principe.

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée $\frac{\partial P_{aer}}{\partial V_2}$ est nulle, soit pour $V_2 = \frac{V_1}{3}$,

la puissance est maximale et vaut [B.Mul, S.Che, A.Iul, Ton.B]:

$$P_{aer} = P_{aer\max} = C_{p\max} \cdot \frac{\rho.S.V_1^3}{2} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho.S.V_1^3}{2} \quad (1.7)$$

On peut donc en déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir $V_2 = \frac{V_1}{3}$, on ne récupère au mieux que 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont, on écrira alors :

$$P_{aer} = C_p \cdot \frac{\rho.S.V_1^3}{2} \quad (1.8)$$

où C_p est le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale 0.593). Ce coefficient dépend de la vitesse du vent en amont V_1 , du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation.

1.2.5 Types d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens :

La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique peut être identifiée selon le générateur électrique utilisé :

- **Le générateur asynchrone :** Le principe de fonctionnement d'une génératrice asynchrone [Muk.R] peut être traduit comme suit : C'est une machine à induction asynchrone qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique. Pour réaliser la génération de l'énergie électrique la machine doit être entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme (variable suivant la charge) le cas d'une génératrice à cage d'écureuil. Son rotor peut être à cage d'écureuil ou bobinée. La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée [Muk.R]. Pour les petites puissances (usuellement < 10 kW), le rotor est à cage d'écureuil, pour des puissances plus importantes, le rotor est bobiné, relié à l'extérieur via un collecteur simplifié à trois bagues, et court-circuité en fonctionnement normal. Mais on peut aussi modifier les propriétés électromécaniques du générateur en agissant sur le rotor par ces connexions «Machine Asynchrone Double Alimentée MADA ». Cependant, pour les machines asynchrones à cages, il faut néanmoins fournir la puissance de magnétisation "puissance réactive" correspondant à une composante du courant réactif. Ce courant peut être emprunté au réseau mais peut aussi bien être obtenu de façon statique en branchant en parallèle à la machine une batterie de condensateurs. En outre, en ajustant ces condensateurs de façon précise, il est possible, dans certaines conditions, d'utiliser une génératrice asynchrone en dehors d'un réseau, en fonctionnement autonome, pour alimenter une charge isolée. Son emploi est réservé aux générateurs de puissance moyenne dont l'arbre d'entraînement tourne à des vitesses fortement variables : mini centrale hydraulique, éolienne, turbine ou moteur à gaz de récupération, certains groupes électrogènes,...etc.
- **Le générateur synchrone :** La génératrice synchrone (ou alternateur) n'a pas besoin de magnétisation extérieure pour créer son champ magnétique. Celui-ci est créé par des bobines ou par des aimants permanents, placés sur le rotor tournant induisant un courant dans le stator bobiné. Cette génératrice étant indépendante du réseau, elle fournit une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation, donc de la vitesse du vent. Le raccordement au réseau, qui lui exige une fréquence fixe, s'effectue par un convertisseur qui comporte un étage redresseur, un bus continu et un onduleur : on reconstruit donc une onde sinusoïdale parfaite, ce qui permet aussi de gérer plus facilement la qualité de l'énergie produite. La

régulation de puissance s'effectue en partie au niveau de ce convertisseur. Elle permet un fonctionnement à vitesse variable, donc à rapport d'avance constant et rendement optimal. Elle permet aussi de limiter les efforts dynamiques en autorisant le rotor à accélérer en cas de forte rafale (stockage d'une partie de l'énergie cinétique du vent dans l'inertie du rotor). Plus complexe à construire et plus chère (aimants permanents, convertisseur), la génératrice synchrone est relativement peu utilisée. C'est Enercon qui introduit ce type de génératrice dans l'éolienne [Fré.P].

- **La génératrice électrique à courant continu :** La génératrice à courant continu (à excitation séparée) [Sai.J] est une machine tournante qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique apparaissant sous forme de tension et courant continu. Elle comporte deux circuits bobinés (figure(1.4)) :
 1. l'un est un circuit inducteur, porté par le stator, et il crée un champ de direction fixe sous les pôles de la machine ; il est pour cela appelé « circuit de champ » ou encore « circuit d'excitation ».
 2. et l'autre est un circuit induit ou circuit d'armature, porté par l'armature du rotor ; il crée des forces électromotrices induites 'F.E.M'.

La force électromotrice F.E.M peut être exprimée par la relation suivante [Ben.A] :

$$E = \frac{P}{a} \cdot N \cdot n \cdot \Phi \quad (1.9)$$

- E : la force électromotrice F.E.M en Volt; P : nombre de paires de pôles ;
- a : nombre de paires de voies en parallèles ; n : la vitesse en tr/s ; N : nombre total de conducteurs actifs ; Φ : le flux par pôle en Wb.

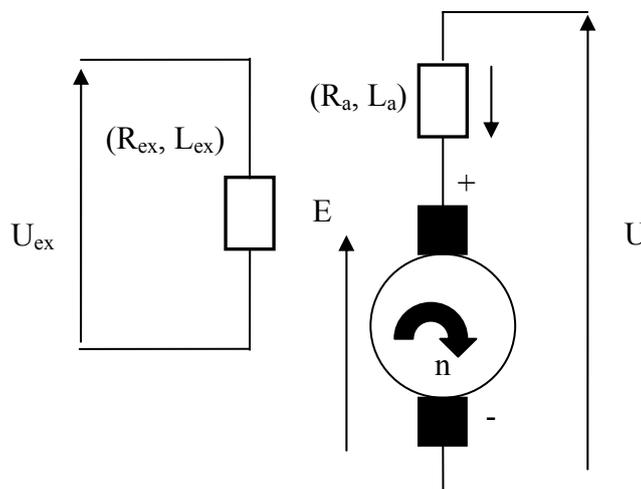


Figure (1.4) Schémas équivalent électrique d'une génératrice à courant continu à excitation séparée.

La tension extraite de la génératrice notée « U » selon le schémas électrique équivalent (figure (1.4)) peut être donnée comme suit [Ben.A] :

$$U = R_a \cdot I + L_a \frac{dI}{dt} - E \quad (1.10)$$

- U : la tension extraite de la génératrice en Volt ; R_a : la résistance de l'induit en Ohms ; L_a : l'inductance de l'induit en Henry ; I : le courant extrait de la génératrice en Ampère ; E : la force électromotrice en Volt ;

La puissance électromagnétique « P_{em} » est donnée par [Hen.R] :

$$P_{em} = E \cdot I \quad (1.11)$$

- P_{em} : la puissance électromagnétique en Watt ;

Le couple électromagnétique « C_{em} » de la génératrice s'exprime par [Ben.A] :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad (1.12)$$

- Ω : la vitesse angulaire en rad/s.

La puissance électrique générée s'écrit [Ben.A] :

$$P = U \cdot I \quad (1.13)$$

- **Générateur à structures spéciales** : des machines à structures spéciales avec un principe de fonctionnement spécial aussi. Le but de leurs fabrications est la réponse au besoin actuel, mentionnant par exemple : la machine à réluctance variable, la Machine Asynchrone Double Stator, ...etc.

1.2.6 Les différentes classes d'un système éolien :

On peut classer les systèmes éoliens à axe horizontal [Sal.E, And.P] en deux différentes classes :

- **Le système éolien à vitesse fixe** : ce sont des systèmes qui fonctionnent pour des vitesses fixes et bien déterminées afin de produire de l'électricité selon les normes. Cette vitesse est définie selon le générateur électrique utilisé. Ce genre de système est destiné à travailler pour des vitesses égales à la vitesse nominale et cela si on admet que la vitesse nominale est celle qui donne au générateur électrique la possibilité de générer une puissance électrique à 50Hz (le cas de notre réseau).
- **Le système éolien à vitesse variable** : ce sont des systèmes aptes à travailler pour des vitesses égales ou différentes de la vitesses nominale [S.El A]. Pour cela plusieurs technologies sont mises en service afin d'assurer ce fonctionnement :

- **La technique mécanique :** c'est une technique qui utilise les paramètres aérodynamiques de la turbine comme outil de variation de la vitesse, et dans ce sens là on distingue deux modes [P.Van, M.Iva] : le « stall control » (basé sur l'accrochage et le décrochage de la génératrice à la turbine), 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 chute plus vite : il s'agit donc d'une solution passive, et le « pitch control » (basé sur l'abaissement et l'augmentation de l'angle de calage des pales, qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante). Il faut noter que cette technique n'est fonctionnelle que pour des vitesses égales ou supérieures à la vitesse nominale.
- **La technique électrique :** c'est une technique qui utilise les convertisseurs statiques comme outil de variation de la vitesse [S.El A].
- **La technique hybride :** c'est une technique qui utilise les deux techniques précédentes à la fois afin d'améliorer le rendement de production et de sécurité du système [Sal.E, Fré.P].

1.2.7 Utilisation des systèmes éoliens:

La technologie des systèmes éoliens, très fiable et très souple, a, depuis des siècles, de multiples usages :

- **Le pompage de l'eau:** Depuis des générations, on utilise le vent comme source d'énergie fiable et économique dans les systèmes de pompage de l'eau. Dans les régions rurales ou éloignées, l'installation d'un système de pompage éolien mécanique ou électrique peut constituer le meilleur moyen d'assurer les besoins en eau du bétail, du ménage ou même de la communauté.
- **Récréation:** Utiliser le vent pour assurer les besoins énergétiques d'un chalet ou d'un bateau peut être plus efficace et plus économique que d'utiliser des générateurs à carburant fossile. Un système éolien écologique peut fournir l'électricité nécessaire à l'éclairage, de même qu'au fonctionnement de la radio et des petits appareils ménagers.
- **Fermes et ranchs:** Les fermiers utilisent le vent pendant des siècles pour pomper eau. Les systèmes éoliens peuvent, de nos jours, rendre encore plus de services dans une exploitation agricole moderne. Comme ils représentent la solution idéale

lorsqu'on a besoin d'électricité à basse tension dans des endroits éloignés, les générateurs fonctionnant à l'énergie éolienne sont utilisés, dans les fermes, pour alimenter en électricité les clôtures électriques et les systèmes d'éclairage extérieur.

- **Usage domestique:** Les habitants de la campagne, désireux de réduire l'effet indésirable sur l'environnement de leur consommation d'énergie, peuvent restreindre leur dépendance par rapport au réseau d'électricité en utilisant un système éolien. Même un mini système éolien permet d'économiser de l'électricité produite à partir de carburants fossiles ou de l'énergie nucléaire.

1.3 Généralités sur les systèmes solaires :

1.3.1 Définition du système solaire :

Le système solaire est un système constitué d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie solaire reçue, directement [Muk.R, Ben.S] ou indirectement [Lau.B] en énergie électrique.

1.3.2 Les différents types d'un système solaire :

Il existe deux différents types de systèmes solaires :

- **Le système solaire à conversion directe :** Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique avec l'utilisation d'une seule technologie nommée PHOTOPILE (effet physique de certains matériaux « l'effet photovoltaïque ») [Ang.C]. L'effet photovoltaïque, fut observé la première fois, en 1839 [Séb.Q], par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Telephone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire ou de base d'un système photovoltaïque. Le mot "**photo**" vient du grec qui veut dire lumière et "**voltaïque**" vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après qui on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt". L'électricité se produit sans bruit, sans parties mécaniques et sans que des produits toxiques soient libérés [P.Tan].
- **Le système solaire à conversion indirecte :** Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique avec l'intermédiaire de deux technologies au minimum [Lau.B].

1.3.3 Les principaux composants d'un système solaire photovoltaïque :

Un système solaire photovoltaïque est généralement constitué de trois ou quatre éléments principaux [Jim.R, S.Chi] :

- Le générateur photovoltaïque, qui représente l'outil de conversion de l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en courant continu. Il est composé d'un ensemble de panneaux. Le panneau est constitué de plusieurs modules (structurés en série ou en parallèle ou hybride). Le module contient des rangés de cellules (structurées en série ou en parallèle ou hybride) et généralement des cellules à base de **silicium**.

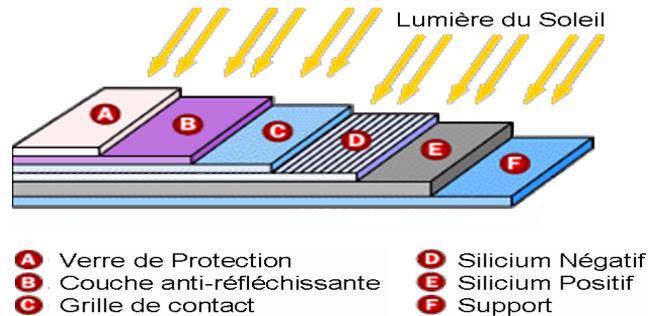


Figure (1.5) Structure d'une cellule solaire en silicium.

- Le stockeur d'énergie (batterie ou accumulateur), qui a le rôle de stocker l'énergie émise par le générateur photovoltaïque et permet par la suite :
 - un déphasage entre la production et la consommation (jour/nuit, mauvais temps) ;
 - une puissance élevée, sur un temps court, compatible avec la production journalière, avec une puissance crête installée faible.

Il faut noter que le stockeur d'énergie n'est pas toujours parmi les composants d'un système solaires photovoltaïque, car il peut être indisponible et cela selon les besoins.

- Le système de contrôle (régulateur), qui assure la sécurité et le bon fonctionnement de la batterie (en cas d'un système avec batterie), plus le fonctionnement optimal de tout le système photovoltaïque. Il est composé généralement d'un hacheur (dévolteur, survolteur ou les deux au même temps) et des jeux de contact. Les hacheurs ou les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Les convertisseurs statiques sont constitués de composants actifs et passifs sophistiqués et performants qui admettent cependant un certain nombre de limitations qui ne sont pas sans conséquence sur la synthèse des boucles de commande. Ainsi, les pertes par commutation limitent la fréquence de commutation, la durée de vie des porteurs impose indirectement des butées de rapport cyclique. Il existe trois types d'hacheurs :

- **Hacheur dévolteur (ou série) :** Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie U_s est inférieure à celle de l'entrée U_e . Pour un rapport cyclique α donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par [Bir.M] :

$$U_s = \alpha U_e \quad (1.14)$$

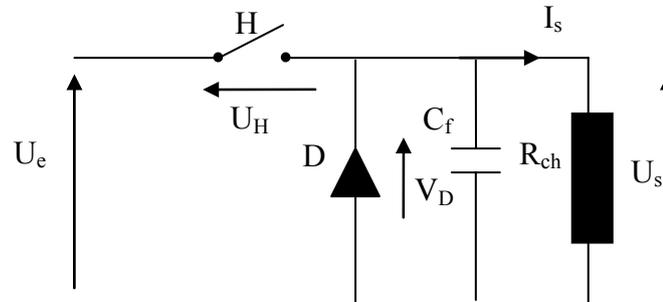


Figure (1.6) Schémas de principe d'un hacheur série

- **Hacheur survolteur (ou parallèle) :** Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie U_s est supérieure à celle de l'entrée U_e . Pour un rapport cyclique α donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par [A.Dje] :

$$U_s = \frac{1}{1-\alpha} U_e \quad (1.15)$$

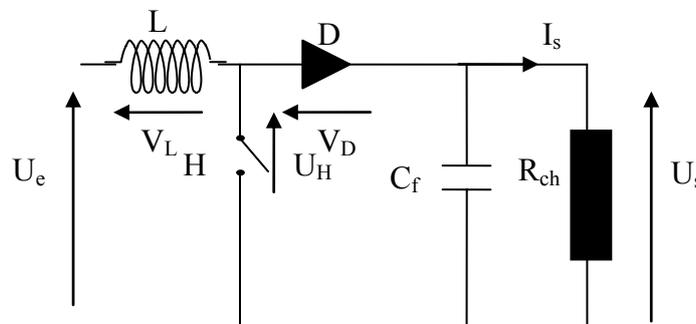


Figure (1.7) Schémas de principe d'un hacheur parallèle

- **Hacheur série-parallèle :** Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie U_s est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée U_e . Pour un rapport cyclique α donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par [Bir.M] :

$$U_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} U_e \quad (1.16)$$

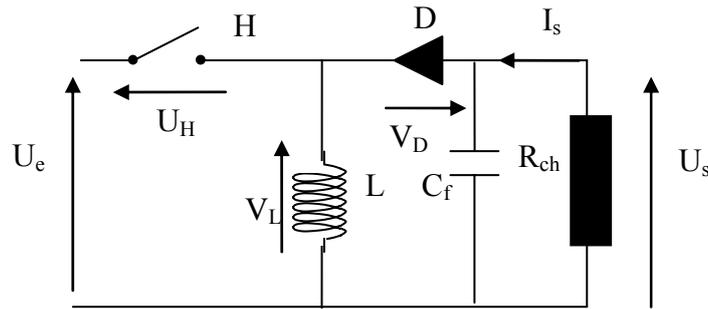


Figure (1.8) Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle.

Le système d'interconnexion, qui relie le générateur photovoltaïque (producteur d'électricité) au consommateur (consommateur d'électricité). C'est un système simple (câbles seulement) ou composé (hacheur, onduleur ou les deux au même temps).

1.3.4 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

Le principe de base d'une cellule solaire faite avec un matériau semi-conducteur comme le silicium amorphe ou microcristallin consiste en une jonction p-i-n [Syl.F], c'est à dire: une zone de silicium dopée "p", une zone de silicium non dopée (intrinsèque) et une zone de silicium dopée "n" [Van.T]. Lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap du silicium atteint la zone intrinsèque, il est absorbé pour créer une paire "électron-trou". Un courant électrique est alors généré par la séparation de cette paire "électron-trou", en direction des deux bornes opposées de la cellule. Cette séparation se fait sous l'action du champ électrique présent dans la zone de silicium intrinsèque. Le trou et l'électron créés dans la couche "i" doivent traverser les couches de silicium dopées ("p" et "n") avant d'atteindre les bornes de la cellule solaire. Malheureusement, ces couches dopées de silicium amorphe ou microcristallin possèdent énormément de "défauts" divers qui provoquent la recombinaison des électrons et trous dans ces couches avant que ceux-ci aient pu atteindre les bornes de la cellule. C'est pourquoi on donne à ces couches dopées le moins d'épaisseur possible. Deux couches conductrices de courant placées aux bornes de la cellule vont récupérer l'électron et le trou qui n'auront alors plus beaucoup de risques de se recombiner [Van.T]. On peut représenter la cellule solaire comme une diode plate qui est sensible à la lumière. Quand un photon de lumière, d'énergie suffisante, heurte un atome sur la partie négative de cette diode, il excite un électron et l'arrache de sa structure moléculaire, créant ainsi un électron libre sur cette partie [Jim.R]. Une photopile est fabriquée de manière à ce que cet électron libre ne puisse se recombiner facilement avec un atome à charge positive, avant qu'il n'ait accompli un travail utile en passant dans un circuit extérieur [Jim.R]. Comme une pile chimique (c'est-à-dire une batterie), la cellule photovoltaïque produira de l'électricité

à courant continu (cc), mais son énergie produite sera fonction principalement de la lumière reçue par la photopile . Aujourd'hui encore, les cellules de silicium **monocristallin** sont toujours les plus efficaces, de 16 % à 18% [Jim.R]. L'arrivée de cellules de silicium **polycristallin**, avec une efficacité de 13 % à 15%, a grandement contribué à baisser le coût des modules. La technologie du silicium **amorphe** (5 %) et l'emploi de semi-conducteurs en couches minces autres que le silicium ont littéralement révolutionné l'industrie photovoltaïque en diminuant les coûts de production et en permettant son utilisation pour de multiples usages. La technologie de l'énergie photovoltaïque est en pleine évolution . D'une efficacité commerciale de 16% à 18%, la pile photovoltaïque a démontré, dans les laboratoires, une efficacité de 38 % et plus grâce à la technologie des nouveaux matériaux [Jim.R]. Pour plus de détails, voir Annexe I pour un compte rendu des différentes technologies photovoltaïques. Et comme conclusion, on peut dire que La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique se déroule en 3 étapes [R.Gar]:

1. absorption de la lumière avec génération de paires électron-trou dans la base p;
2. séparation des paires électron-trou dans la zone avec charge d'espace / SCR;
3. recombinaison, après que le courant I_{ph} ait parcouru le consommateur.

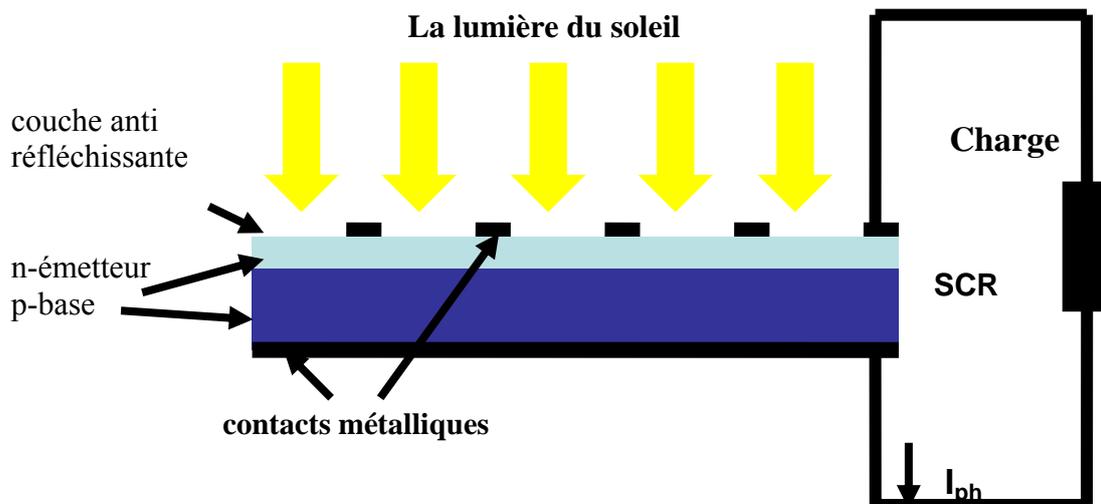


Figure (1.9) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

1.3.5 Classification d'un système solaire photovoltaïque :

Le système solaire photovoltaïque peut être classifié selon l'autonomie en deux classes :

- a) **Le système photovoltaïque autonome** : ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique, et cela à l'aide de plusieurs composants mais le plus importants ce sont les batteries qui

aident à emmagasiner de l'énergie électrique. Il faut mentionner que les batteries les plus utilisées dans le marché actuellement sont [Jim.R] :

- **Accumulateurs au plomb-acide** : L'accumulateur au **plomb-acide** contient une plaque positive, ou cathode, faite d'oxyde de plomb (PbO_2), et une plaque négative, ou anode, faite de plomb. Ces plaques sont immergées dans un électrolyte, l'acide sulfurique dilué. Quand une charge est connectée entre les deux plaques, l'oxyde de plomb de la plaque cathodique et le plomb de la plaque anodique sont convertis en sulfate de plomb en réaction avec l'acide sulfurique de l'électrolyte. Cette réaction amène un flux d'électrons entre les deux plaques au travers du circuit externe.
 - **Accumulateurs au nickel-cadmium** : Les accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd) sont conçus pour les cas où l'on a besoin d'un dispositif de stockage d'énergie robuste et de longue durée, exigeant peu d'entretien. Le matériau actif de l'électrode positive (cathode) est une plaque d'oxi-hydroxyde de nickel (NiOOH) qui, pendant la décharge, accepte les électrons provenant du circuit externe et passe ainsi à une valence moindre. L'électrode négative (anode) est constituée d'une plaque de cadmium, et l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) à concentration variant entre 20 % et 35%. La tension de l'accumulateur est nominalement de 1,2 volt.
- b) **Le système photovoltaïque non autonome** : ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique plus l'aide d'autres sources d'énergie électrique. Il faut noter que les deux systèmes autonome et non autonome sont de même dimension.

1.3.6 Utilisation des systèmes solaires:

- L'éclairage (autoroutes, arrêts d'autobus,...) ;
- Les communications (Stations de relais de téléphone, bornes d'appel d'urgences sur autoroutes, téléphones mobiles,..) ;
- La fourniture d'électricité pour des sites éloignés du réseau normal (Forêts, montagnes, ..) ;
- Capteurs isolés (Infos météorologique, enregistrements sismiques, recherche scientifique,..) ;
- Pour de petites stations de pompage ou d'irrigation ;
- Chargement des batteries de voitures (les batteries normales, ou de voitures électriques..) ;

- Protection contre la corrosion (car les pipes-lines et autres tuyaux enfouis sous terre ou dans l'eau perdent des ions et rouillent, on peut les protéger en appliquant une différence de potentiel, donc un courant électrique) ;
- Evidemment l'utilisation de cellules photovoltaïques est plus efficace dans les régions très ensoleillées [K.Agr], telles que les Etats-Unis ou les pays du sud en général, mais cela ne veut pas dire qu'on ne peut pas les utiliser dans le reste du monde ;
- Compensation du facteur de puissance dans les réseaux électriques de distribution [D.Pon].

1.4 Généralités sur les systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides ce sont des systèmes qui combine entre deux ou plusieurs sources d'énergies différentes, et cela afin d'assurer la continuité du service électrique ou avoir plus d'énergie avec un cou min ou encore minimisé le danger environnemental, et dans ce sens là, plusieurs architectures sont envisageable [Muk.R]:

1.4.1 Le système hybride éolien-générateur à combustible : c'est un système qui combine entre la turbine éolienne et un générateur à combustible (le diesel ou autre chose). Le système éolien qui produit une puissance électrique instable (énergie cinétique du vent instable) est accompli par le générateur à diesel et cela pour assuré la stabilité de cette dernière.

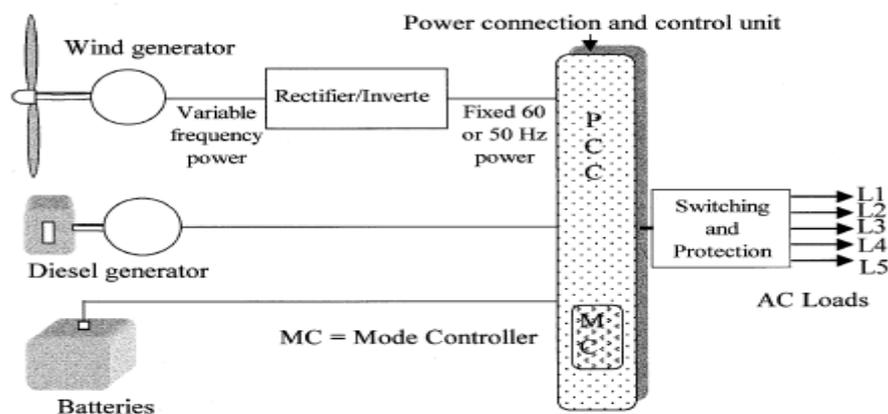


Figure (1.10) Schémas de principe d'un système hybride éolien-diesel [Muk.R].

1.4.2 Le système hybride éolien-pile à combustible : c'est un système qui combine entre la turbine éolienne et la pile à combustible qui remplace le générateur à diesel avec l'avantage d'être propre (non polluante), son principe de fonctionnement est illustré par la figure (1.11).

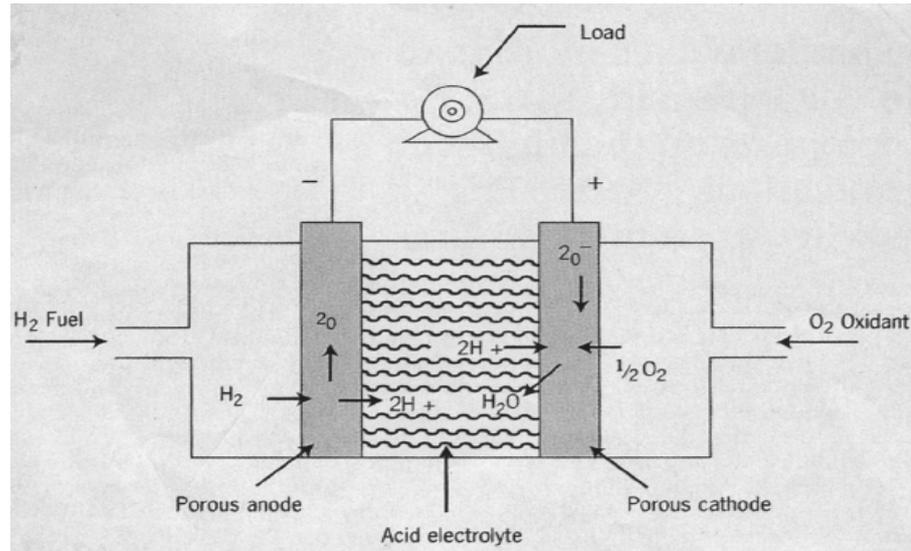


Figure (1.11) Principe de fonctionnement d'une pile à combustible [Muk.R].

1.4.3 Le systèmes hybrides solaire-générateur à combustible : c'est un système qui combine entre le système solaire photovoltaïque ou autres avec le générateur électrique à combustible (diesel ou autre) et cela comme le montre le schéma ci-dessous (figure (1.12)):

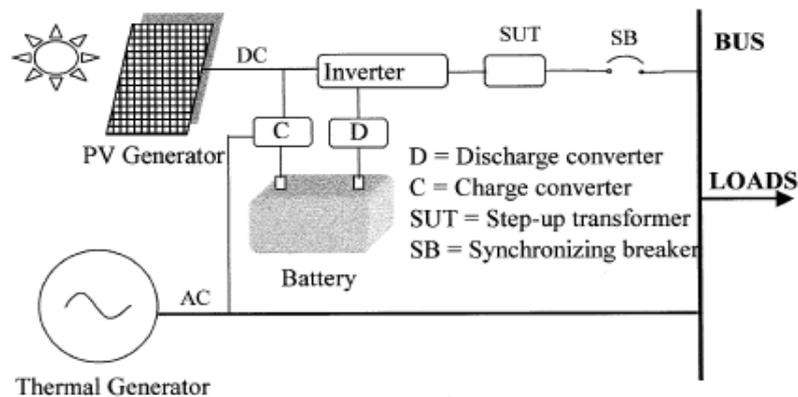


Figure (1.12) Schéma de principe d'un système hybride solaire photovoltaïque-générateur thermique [Muk.R].

1.4.4 Le systèmes hybrides solaire-pile à combustible : c'est un système qui combine entre le système solaire photovoltaïque ou autre avec celui de la pile à combustible.

1.5 Conclusion:

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes éoliens et les systèmes solaires. La première partie et après un rappel des notions

élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur principe de fonctionnement ont été décrits. La seconde partie du chapitre a été consacrée aux systèmes solaires et plus précisément ceux d'origines photovoltaïques. La troisième partie a été réservée à une description bref de quelques systèmes dits hybrides.

CHAPITRE 2 :

LE SYSTEME EOLIEN A VITESSE VARIABLE

2.1 Introduction

Un système de conversion d'énergie éolienne est composé de la turbine éolienne ayant une caractéristique qui lui est propre et qui dépend des paramètres de construction définissant son potentiel à prélever l'énergie de la masse d'air en mouvement. La voilure est connectée à une génératrice par le biais d'un multiplicateur. Dans le cas de voilures de faible taille, la vitesse de rotation est suffisante pour qu'une machine dédiée de type synchrone, à grand nombre de pôles puisse être attaquée directement sans multiplicateur. La courbe de puissance est en forme de cloche (voir figure 2.1) [S.Che, M.Iva], typique des éoliennes, nécessite une adaptation de la charge mécanique afin d'assurer un bon prélèvement énergétique au gré du vent : on parle ainsi de maximisation de la puissance MPPT (Maximum Power Point Tracking). La nécessité de ce type d'optimisation énergétique est d'autant plus significative qu'on utilise une voilure à axe vertical. En effet, la caractéristique en forme de cloche est nettement plus marquée que pour une turbine tripale classique, ce qui sensibilise le prélèvement énergétique en fonction de la charge opposée par la génératrice sur l'arbre mécanique [Ada.M].

Afin d'exploiter le maximum d'énergie cinétique du vent disponible, le système nommé MPPT est indispensable. La puissance capturée par la turbine éolienne (Eq. 1.8, Ch.1) peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse λ), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. Dans ce chapitre, on va essayer d'entamer le principe de fonctionnement plus la modélisation des systèmes éoliens à axe horizontal à vitesse variable.

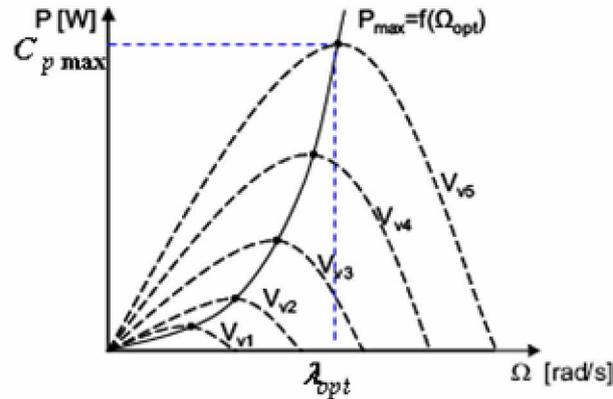


Figure (2.1): Maximisation de puissance d'une éolienne à vitesse variable

2.2 Définition et principe de fonctionnement du système éolien à vitesse variable :

Le système éolien à vitesse variable est un système apte à travailler pour des vitesses égales ou différentes de la vitesse nominale (optimal) à l'aide du sous système MPPT, et cela pour produire la puissance max [S.El A]. L'MPPT peut être définie comme étant un algorithme [Ada.M] ou un système [Sal.E] capable d'aider le système éolien à axe horizontal à vitesse variable pour extraire le maximum de puissance électrique à partir de l'énergie cinétique du vent disponible.

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la Figure 2.1. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée $\lambda_{opt} = \lambda_{C_{pmax}}$ et C_p donné nommé C_{pmax} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par la caractéristique correspondant à cette relation donnée sur la zone II de la figure (2.2). La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts. La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivrée par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les

convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables.

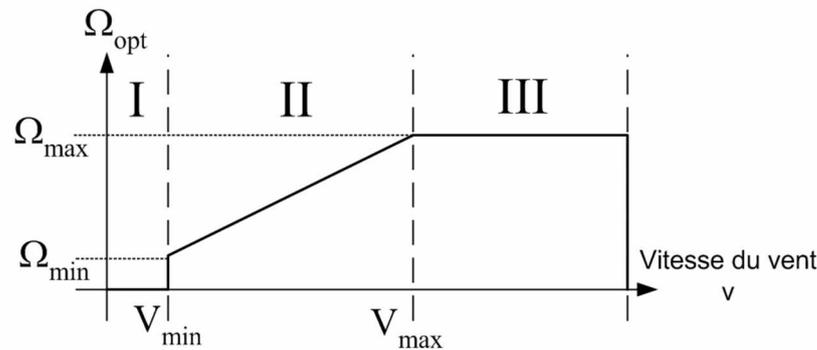


Figure (2.2) Diagramme de la vitesse angulaire sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent [Fré.P].

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire [Fré.P]. Pour chaque vitesse de vent, il faut que le système trouve la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale qui correspond aussi à un couple de charge strictement défini. Le schéma de la figure (2.1) donne les courbes caractéristiques de la voilure éolienne de type Savonius dans le plan puissance-vitesse de rotation de la voilure. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse du vent V donnée. Cette famille des courbes est obtenue directement à partir de la caractéristique C_p de la voilure. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale de forme cubique. Idéalement, cette courbe doit être suivie à tout moment du fonctionnement du système éolien. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique doit être utilisée.

2.3 Modélisation d'une turbine éolienne à vitesse variable :

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, a une variation aléatoire et a une caractéristique très fluctuante [E.Jea]. Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent.

2.3.1 Hypothèses simplificatrices :

Si on suppose que la turbine étudiée comprend trois pales de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$. Cet arbre entraîne une génératrice électrique.

Il faut noter que les grands systèmes et généralement les systèmes utilisant des génératrices électriques asynchrones, contiennent un intermédiaire entre l'arbre et la génératrice électrique

nommé « multiplicateur ». Alors pour ce genre de système, l'arbre entraîne le multiplicateur de gain G qui entraîne lui-même une génératrice électrique.

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale} ;
- la même élasticité K_{pale} ;
- le même coefficient de frottement par rapport à l'aire $f_{pale/aire}$.

Si on suppose que les pales sont orientables alors elles présentent le même coefficient de frottement f_{pale} par rapport au support. Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées β_1, β_2 , et β_3 . Les trois pales reçoivent respectivement les forces F_1, F_2 et F_3 qui dépendent de la vitesse du vent qui leur est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie J_{arbre} ;
- son élasticité K_{arbre} ;
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur $f_{arbre/multiplicateur}$.

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g ;
- un coefficient de frottement f_g .

Ce rotor transmet un couple entraînant C_g à la génératrice électrique et tourne à une vitesse Ω .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité des trois forces de poussée ($F_1 = F_2 = F_3$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'aire est très faible et peut être ignoré. De même, pour une grande turbine, sa vitesse étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure (2.3)).

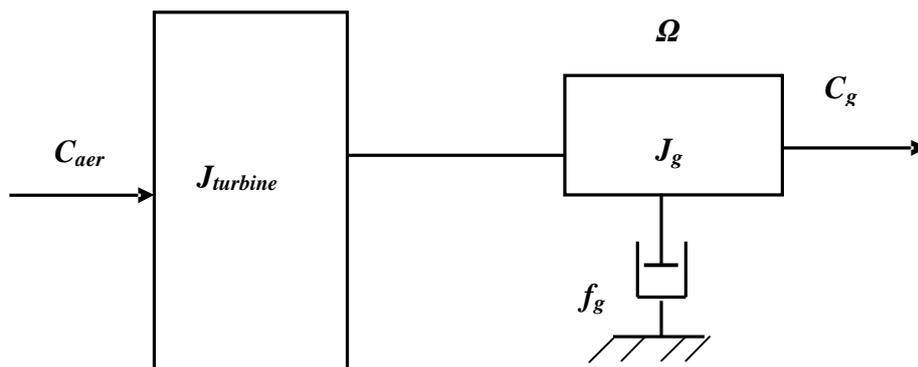


Figure (2.3) Modèle mécanique simplifié de la turbine

2.3.2 Modélisation de la turbine :

La turbine éolienne étudiée ici, est constituée de pales de longueur R entraînant une génératrice électrique avec l'intermédiaire de l'arbre de la turbine (figure (2.4)).

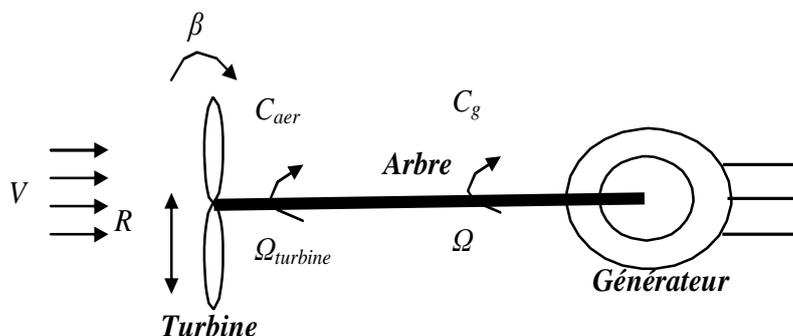


Figure (2.4) Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent P_V ou puissance éolienne est définie de la manière suivante [Sal.E]:

$$P_V = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (2.1)$$

où : ρ est la densité de l'air (approximativement 1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C),

S est la surface balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale et V la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique P_{aer} apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit [Sal.E] :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_V = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (2.2)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient est en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle d'orientation de la pale β .

Le coefficient λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent [Sal.E] :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V} \quad (2.3)$$

où : $\Omega_{turbine}$ est la vitesse de la turbine et R la longueur de la pale ;

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique peut être donné comme suit :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2 \cdot \Omega_{turbine}} \quad (2.4)$$

2.3.3 Modèle du multiplicateur :

Le rôle du multiplicateur est l'adaptation de la vitesse lente de la turbine à la vitesse nominale de la génératrice s'il est nécessaire. Ce multiplicateur est peut être modélisé mathématiquement par les équations suivantes [Sal.E] :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.5)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega}{G} \quad (2.6)$$

2.3.4 Modélisation de l'arbre de la turbine :

La masse de l'éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. L'inertie totale de l'arbre J qui apparaît sur le rotor de la génératrice peut être donnée comme suit [Sal.E] :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g = J_{turbine} + J_g \quad (2.7)$$

où : G^2 est le gain du multiplicateur égale à 1 dans notre cas et J_g l'inertie de la génératrice électrique.

Il est à noter que le moment d'inertie de la génératrice epeut être négligé devant l'inertie de la turbine et cela dans le cas des grosses éoliennes. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor [Sal.E] :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{mec} \quad (2.8)$$

Le couple mécanique C_{mec} prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_r , et le couple issu du multiplicateur C_g [Sal.E].

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_r \quad (2.9)$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f [Sal.E]:

$$C_r = f.\Omega \tag{2.10}$$

En se basant sur ce qui a précédé, la turbine d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable peut être modélisée comme le montre le schéma bloc de la figure (2.5).

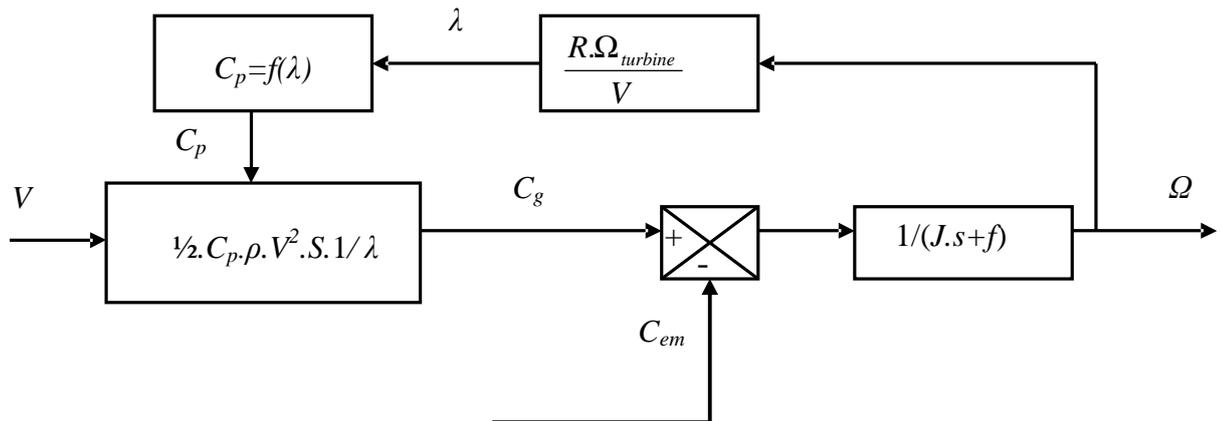


Figure (2.5) Schéma bloc d'une turbine éolienne à vitesse variable.

L'expression du coefficient de puissance C_p est spécifique à chaque éolienne et dépend des caractéristiques intrinsèques de celle-ci. Si on suppose que l'angle de calage β ($\beta=2$) est fixe, l'expression du C_p en fonction de λ seulement peut être donné comme suit [F.Poi] :

$$C_p = 7,9563.10^{-5}.\lambda^5 - 17,375.10^{-4}.\lambda^4 + 9,86.10^{-3}.\lambda^3 - 9,4.10^{-3}.\lambda^2 + 6,38.10^{-2}.\lambda + 0,001 \tag{2.11}$$

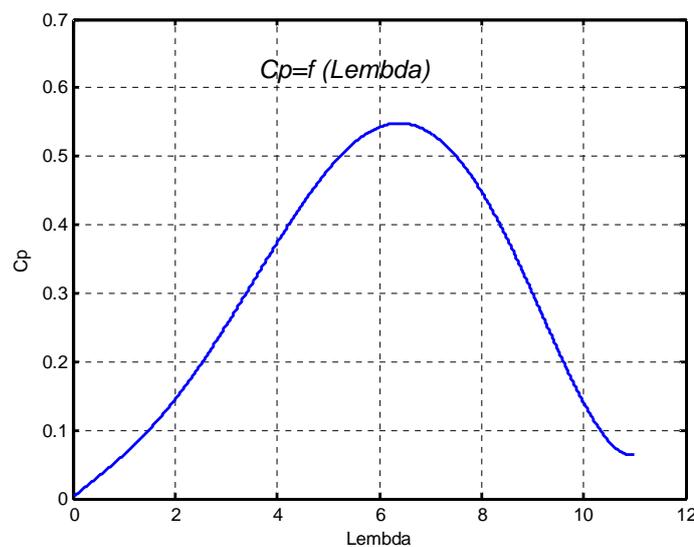


Figure (2.6) Evolution du C_p en fonction de Lambda ' λ '.

De la figure 2.6, on peut déduire que le $C_{pmax}=0.54$ et $\lambda_{Cpmax}=6.41$. Le modèle de notre turbine à axe horizontal sur la plateforme Simulink du logiciel Matlab avec les données suivantes : « $R= 1m$; $\rho =1.22 \text{ kg/m}^3$ » donne les résultats suivants :

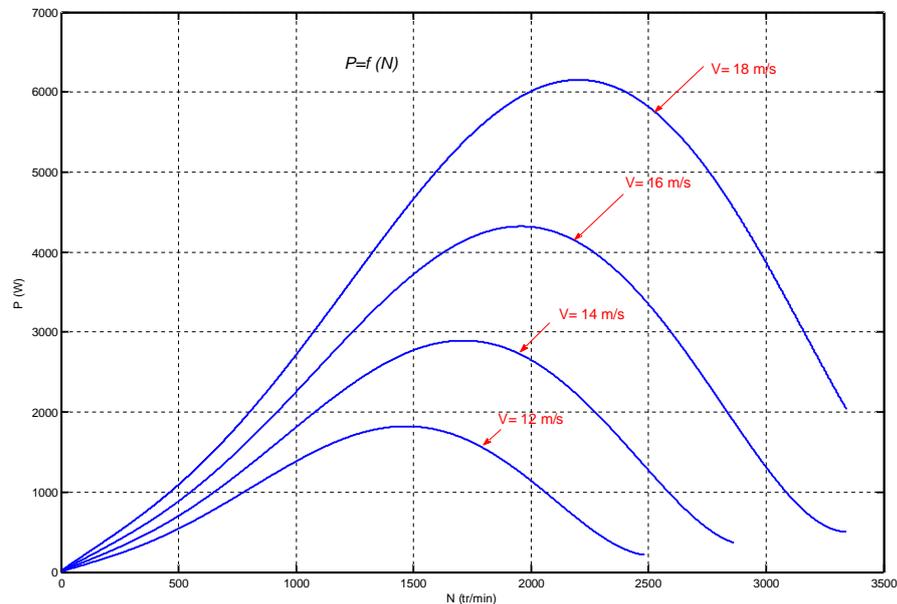


Figure (2.7) La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation

On remarque de la figure (2.7) que la puissance électrique est variable avec la variation de la vitesse angulaire mécanique de la turbine. L'allure de la puissance en fonction de la vitesse angulaire est semblable à celle du C_p en fonction de λ (ratio de vitesse). On remarque aussi que plus la vitesse du vent est grande plus la puissance délivrée est grande et qui est tout a fait normal car la puissance est exprimée par la vitesse cube du vent.

2.4 Les différents types d'MPPT éoliens:

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. Pour cela, on peut distinguer deux approches (types) possibles :

- La première, la moins classique, considère que la caractéristique C_p n'est pas connue ;

- La seconde façon d'agir, plus répandue, suppose que cette caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

2.4.1 Maximisation de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure:

Pour l'étude de la commande permettant d'effectuer une recherche du point maximal de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique C_p , une structure avec redresseur MLI triphasé peut être utilisée [Ada.M]. Cette structure assure un contrôle dynamique en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation et ainsi d'effectuer par ce biais une recherche de la puissance maximale souhaitée. En l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des algorithmes de comportement sont à tenir afin de converger vers le point optimal. Ces algorithmes dépendent des variations de puissance ΔP et de vitesse $\Delta \Omega$. Par exemple : si on mesure une augmentation de puissance ($\Delta P > 0$) suite à un incrément positif de vitesse, on doit continuer à accélérer la voilure ($\Delta \Omega_{ref} > 0$). On se situe alors sur la partie gauche de la cloche $P(\Omega)$ (figure 2.1). L'utilisation d'un dispositif MPPT (Maximum Power Point Tracking) basé sur le principe des ensembles flous peut être réalisable [Ada.M]. Il existe aussi d'autres structures, comme celle basée sur la machine asynchrone à cage, pilotée par le stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques [Sal.E, A.Pet], et celle basée sur la machine asynchrone à rotor bobiné ou la vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissances situés au circuit rotorique [S.El A].

2.4.2 Maximisation de la puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure:

Une autre façon de procéder consiste en une pseudo recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique de la voilure éolienne à piloter. Ces méthodes permettent de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano-électrique, c'est-à-dire sans obligation de capture de la vitesse du vent. Cette façon de procéder exige au constructeur de la voilure des essais de caractérisation (extérieur, soufflerie) ou des simulations du profil de pales.

- **Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :** Si on suppose que la génératrice est idéale, donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique C_{em} développé est à tout instant égal à sa valeur de référence C_{em-ref} , (c-à-d : $C_{em} = C_{em-ref}$). Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$ qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. La vitesse de la génératrice Ω égale à $\Omega_{turbine}$ (pas de multiplicateur) est influencée par l'application de trois couples : le couple éolien C_g , le couple électromagnétique C_{em} et le couple résistant C_r . En regroupant l'action de ces trois couples on peut écrire [Sal.E] :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (C_g - C_{em} - C_r) \quad (2.12)$$

avec, J : l'inertie de la turbine plus l'inertie de la génératrice.

Cette structure de commande (figure 2.8) consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine C_{aer} de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, l'utilisation d'un asservissement de la vitesse est indispensable. Alors le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est basé sur la relation suivante [Sal.E] :

$$C_{em-ref} = K_{reg} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega) \quad (2.13)$$

K_{reg} : le régulateur de vitesse (il peut être PI ou à avance de phase....etc.).

Cette vitesse de référence Ω_{ref} dépend de la vitesse de la turbine à fixer $\Omega_{turbine}$ pour maximiser la puissance extraite. La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle de la valeur optimale du ratio de vitesse λ_{Cpmax} (β constant) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p . Alors on peut écrire :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{Cpmax} \cdot V}{R} \quad (2.14)$$

- **Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse :** Cette seconde structure de commande (figure 2.9) repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [Sal.E] :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_g - C_{em} - C_r = 0 = C_{mec} \quad (2.15)$$

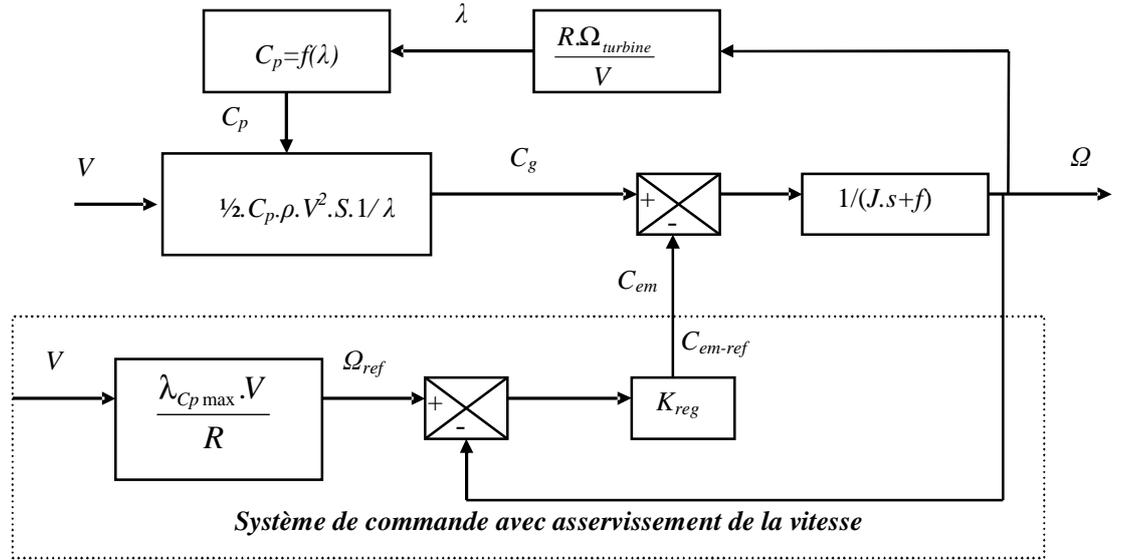


Figure (2.8) MPPT avec asservissement de la vitesse.

Une mesure précise de la vitesse du vent est pratiquement difficile. Ceci pour deux causes :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine [Sal.E], ce qui errone la lecture de la vitesse du vent ;
- Le diamètre de la surface balayé par les pales étant important.

Selon L'équation (2.16), le couple mécanique C_{mec} est nul. Donc, si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux ($C_r \cong 0$), on obtient :

$$C_{mec} = C_g \quad (2.16)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-ref} = C_{aer-estimé} \quad (2.17)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation :

$$C_{aer-estimé} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_{estimé}^3}{2 \cdot \Omega_{turbine-estimé}} \quad (2.18)$$

L'estimation de $\Omega_{turbine}$ vient de la mesure de la vitesse mécanique Ω : $\Omega_{turbine-estimé} = \Omega$

La vitesse du vent estimée peut être donnée par l'équation suivante :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (2.19)$$

En se basant sur les équations précédentes, on peut alors écrire :

$$C_{em-ref} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot \Omega^2 \cdot \pi \cdot R^3}{2 \cdot \lambda^3} \tag{2.20}$$

Pour extraire le maximum de puissance, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur λ_{Cpmax} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} . Le couple électromagnétique doit être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{pmax} \cdot \rho \cdot \Omega^2 \cdot \pi \cdot R^3}{2 \cdot \lambda_{Cpmax}^3} \tag{2.21}$$

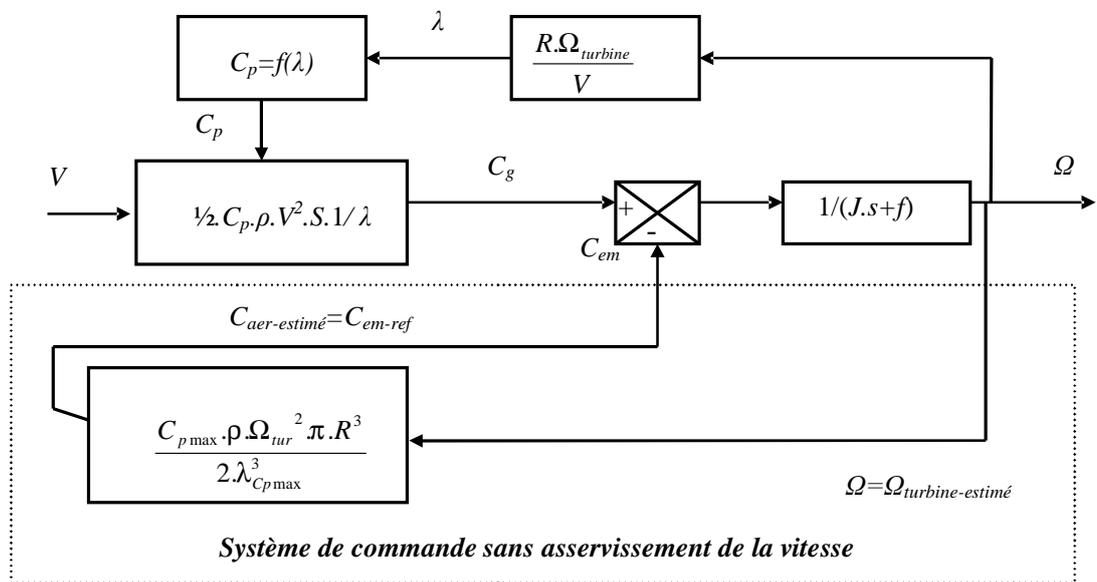


Figure (2.9) MPPT sans asservissement de la vitesse.

2.5 Modélisation et implantation d'un simulateur éolien :

Pour reproduire la caractéristique (Ω (vitesse angulaire), P (puissance électrique), V (vitesse du vent)) d'une éolienne à vitesse variable et valider les résultats obtenus par simulation expérimentalement, on va utiliser un système nommé simulateur éolien (reproducteur de comportement d'une éolienne à vitesse variable) et qui peut être schématisé comme suit :

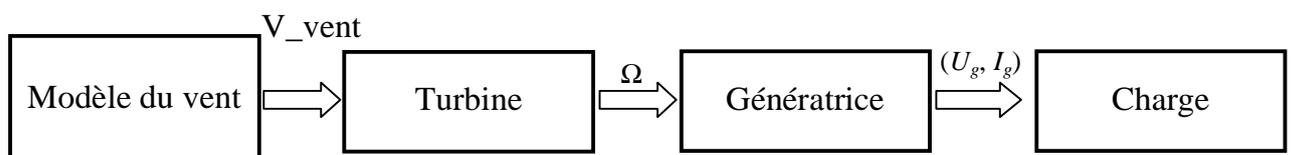


Figure (2.10) Schémas de principe d'un simulateur éolien

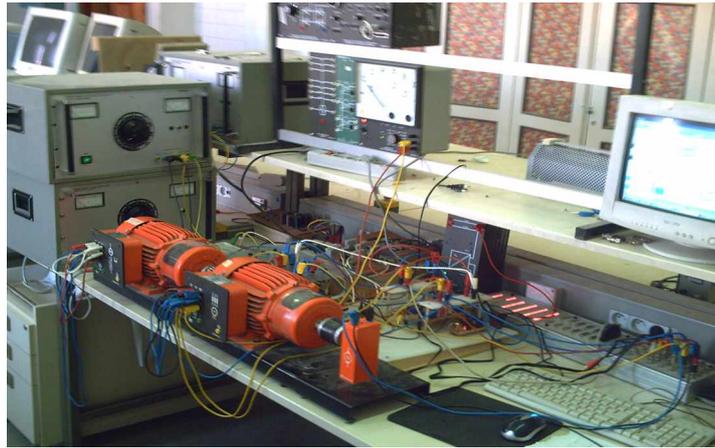


Figure (2.11) Photo du banc d'essai du simulateur éolien.

2.5.1 Modèle de la vitesse du vent (V (m/s)) :

Dans le but de reproduire les caractéristiques de la vitesse du vent, il existe deux possibilités qui sont les mesures expérimentales et la modélisation analytique. La première consiste à effectuer des mesures expérimentales sur un site éolien bien défini. Cette première solution est certes beaucoup plus précise que la deuxième mais seulement elle ne permet pas de simuler différents types de profil de vitesse du vent. Ceci veut dire que le profil de la vitesse du vent obtenu sera propre à un site donné et ne pourra plus être modifié si on veut obtenir un fonctionnement ne correspondant pas au profil du site considéré. La deuxième possibilité semble plus souple car il s'agit d'une modélisation analytique de la grandeur. La vitesse du vent peut être décomposée en deux composantes :

- ü Sur une échelle de temps comprise entre quelques fractions de secondes et quelques heures, le vent peut être considéré comme un phénomène aléatoire. Cette composante s'appelle « la composante de turbulence notée (V_t) ».
- ü Sur de plus longues périodes, les caractéristiques moyennes du vent dans un site donné varient régulièrement. Cette composante est dénommée « composante lente notée (V_l) ».

Parmi les méthodes les plus utilisées pour modéliser le vent [E.jea] : la méthode qui utilise la caractéristique spectrale de Van Der Hoven. Dans ce modèle, la composante de turbulence est considérée comme un processus aléatoire stationnaire et donc elle ne dépend pas de la variation de la moyenne de la vitesse du vent. A partir de cette caractéristique spectrale de puissance, on effectue une discrétisation directe (pour plus de détail voir Annexe II). Alors la vitesse du vent [E.jea] peut s'écrire comme suit :

$$V(t) = v_l(t) + v_t(t) = \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^{N_t} A_i \cos(w_i t + \phi_i) + \frac{2}{\pi} \sum_{N_t}^N A_i \cos(w_i t + \phi_i) \quad (2.22)$$

Tel que :

A_i : l'amplitude de chaque composante spectrale ;

w_i : la pulsation en rad/s ;

φ_i : la phase en rad.

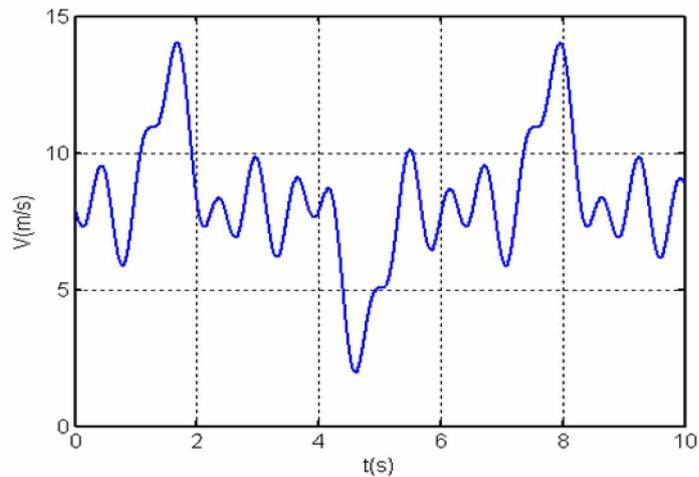


Figure (2.12) La vitesse du vent $V(m/s)$ en fonction du temps $t(s)$.

2.5.2 Modèle de la turbine :

Le modèle de la turbine (avec son MPPT) proposé, sera celui sans asservissement de la vitesse. Ce modèle va porter comme variable d'entrée la vitesse du vent $V(m/s)$ et comme variable de sortie la vitesse angulaire Ω_{ref} (rad/s), telle que cette dernière est la vitesse pour laquelle la puissance est max.

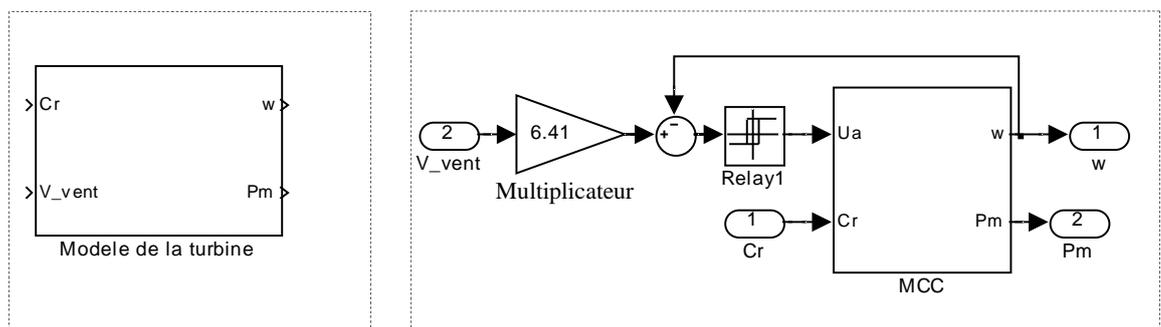


Figure (2.13) Simulateur de la turbine

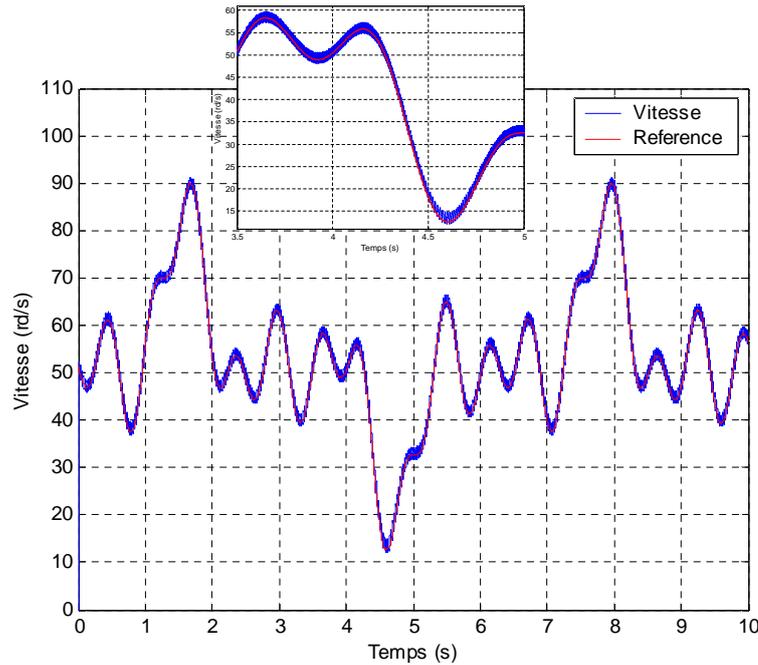


Figure (2.14) Vitesse de la turbine et vitesse de référence en fonction du temps

2.5.3 Modèle de la génératrice :

La génératrice utilisée est la machine à courant continu à excitation séparée, et la mise en équation peut se faire comme suit :

$$\begin{cases} U_{ex} = R_{ex} I_{ex} + L_{ex} \frac{dI_{ex}}{dt} \\ U = -R_a I - L_a \frac{dI}{dt} + M \cdot I_{ex} \Omega \\ J_g \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = p \cdot (C - C_{em}) \\ C_{em} = M \cdot I_{ex} \cdot I \end{cases} \quad (2.23)$$

Tel que :

U_{ex} : la tension d'excitation en Volt ; I_{ex} : le courant d'excitation de la génératrice en Ampère ;

U : la tension extraite de la génératrice en Volt ; I : le courant extrait de la génératrice en Ampère ;

E : la force électromotrice en Volt ;

R_{ex} : la résistance de l'excitation en Ohms ; L_{ex} : l'inductance de l'excitation en Henry ;

R_a : la résistance de l'induit en Ohms ; L_a : l'inductance de l'induit en Henry ;

M : inductance mutuelle entre les enroulements d'induit et ceux d'excitation en Henry ;

C_{em} : le couple électromagnétique en N.m ; Ω : la vitesse angulaire en rad/s ;

C : le couple mécanique en N.m ; p : nombre de paires de pôle ; J_g : le moment d'inertie en $Kg.m^2$;
 f : coefficient de frottement.

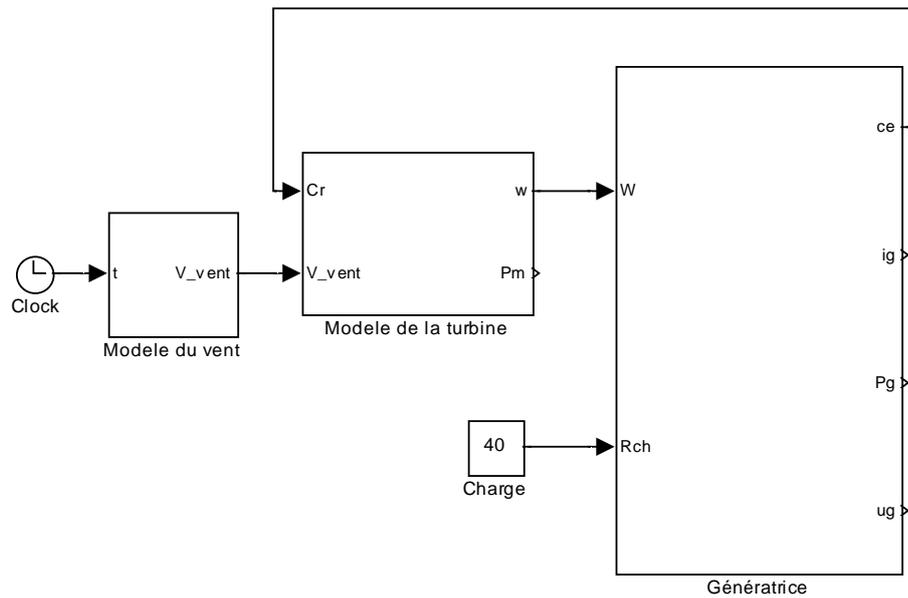


Figure (2.15) Schéma générale du simulateur éolien.

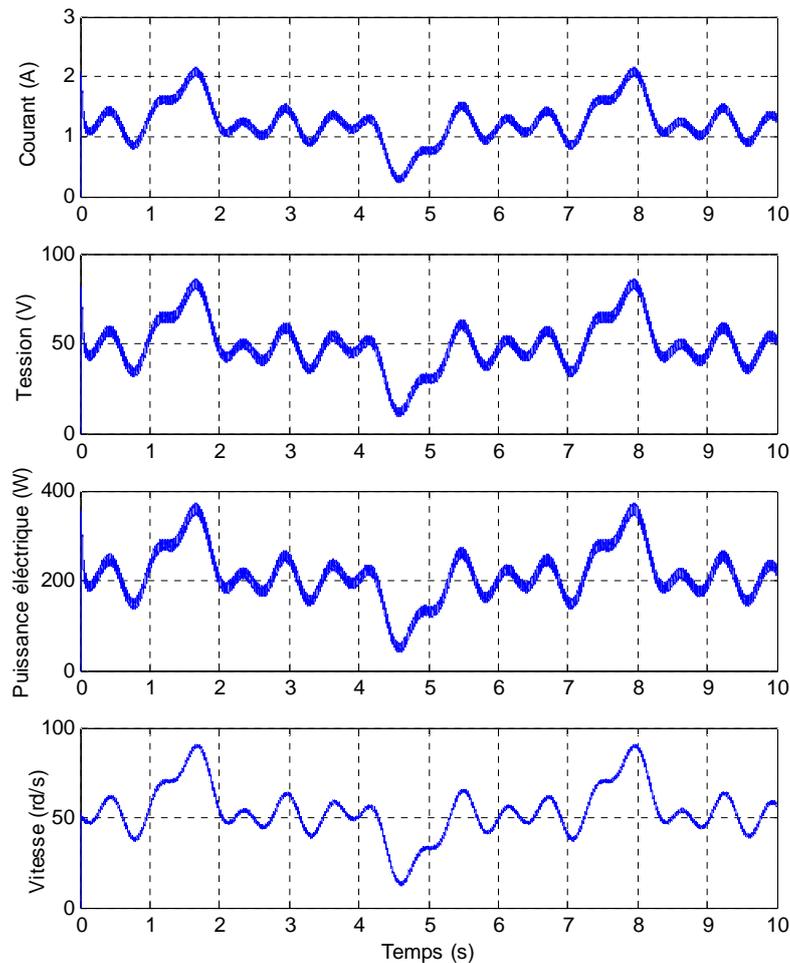


Figure (2.16) Courant, tension et puissance délivrée par la génératrice pour une charge de 40Ω

A partir des résultats obtenus, on peut dire que la vitesse du simulateur éolien (courant, tension et puissance) suit avec une efficacité acceptable la vitesse de référence proposée malgré le dépassement remarquable (bande) qui est l'effet du régulateur hystérésis utilisé et la fréquence limitée des composants.

2.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, on s'est proposé de modéliser un système éolien dans l'objectif de monter au laboratoire un banc d'essai permettant de simuler le fonctionnement de l'éolienne. L'éolienne considérée est celle à axe horizontal. Le modèle de la turbine est celui où l'on tient compte de la MPPT dans le but d'extraire le maximum de puissance.

CHAPITRE 3:

LE SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

SANS BATTERIE

3.1 Introduction :

Une cellule solaire photovoltaïque est assimilable à une diode photo sensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cette conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, s'effectue donc sans pièce mobile, sans fluide sous pression, sans pollution ni production de déchets. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque (Bequerelle 1889). Quand une jonction PN ou une jonction métal-semi-conducteur (diode SCHOTTKY) est éclairée par des photons d'énergie supérieure à la valeur du gap E_g , des paires électron-trou sont générées et séparées sous l'influence du champ électrique interne qui règne dans la zone de transition, dite de charge d'espace. Expérimentalement, il est possible d'étudier cet effet de deux manières:

- a) Lorsque la jonction est utilisée sans polarisation extérieure, une différence de potentiel ($\Delta\phi$) apparaît à ses bornes. C'est le fonctionnement en photopile. Les paires électron-trou créées lors de l'illumination sont collectées dans la zone de charge d'espace, l'existence du champ électrique interne permettant de s'affranchir d'une source extérieure. Les convertisseurs photovoltaïques d'énergie solaire fonctionnent de cette façon.
- b) Lorsque la jonction est polarisée, son courant de saturation est modifié par l'apport de paires électron-trou. C'est le fonctionnement en photodiode.

Plusieurs cellules photovoltaïques sont connectées entre elles afin de fournir au récepteur extérieur une tension et une puissance adéquates. Ces ensembles de cellules sont ensuite encapsulés dans des modules étanches qui les préservent de l'humidité et des chocs. Le courant de sortie, et donc la puissance, sont généralement proportionnels à la surface du module.

L'extraction du maximum de puissance d'un générateur photovoltaïque, PV (ensemble de modules) est indispensable pour plusieurs causes (P_{max} pour un coût min,...etc.).

Dans ce troisième chapitre, on va essayer de détailler le système solaire photovoltaïque sans batterie (générateur photovoltaïque) en plus de ses MPPT.

3.2 Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque:

3.2.1 La caractéristique courant-tension :

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode [Ang.C]. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_{sh} comme le montre le schéma équivalent de la figure (3.1) [Ang.C, Bou.O, Yan.P]. La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts faces avant et arrière. La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule [Muk.P].

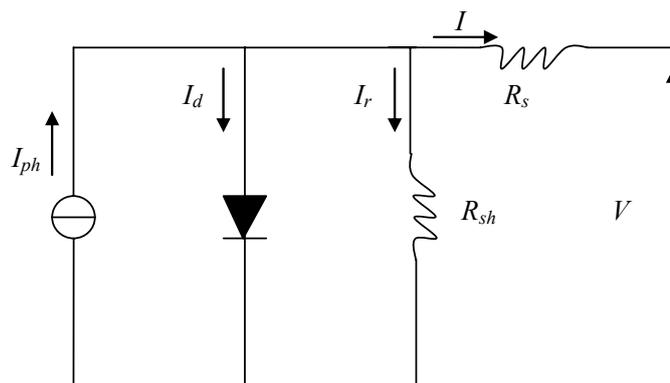


Figure (3.1) Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque.

Le courant de la photopile a pour expression [Yan.P, Ben.B, Tom.M]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (3.1)$$

avec :

- $I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{\psi}{1000} \right)$: Photo-courant de cellule, proportionnel à l'éclairement ψ .

Ce courant correspond également au courant court circuit I_{cc} , avec : $I_{sc} (S.C.Curent) \cong I_{cc}$.

- $I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right)$: est le courant traversant la diode. On peut faire apparaître le potentiel thermodynamique $V_T = \frac{nkT}{q}$ (I_0 : le courant de saturation inverse de la diode ; q : charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C) ; k : constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) ; n : facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique ; T : température de la jonction en K).
- $I_r = \frac{V + R_s I}{R_{sh}}$ est le courant dérivé par la résistance shunt.

A partir de ces différentes équations, on peut en tirer l'expression implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque ainsi que sa caractéristique courant-tension.

$$I = I_{sc} \left(\frac{\psi}{1000} \right) - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (3.2)$$

On peut ainsi retrouver l'allure des caractéristiques courant-tension $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire à la figure (3.2).

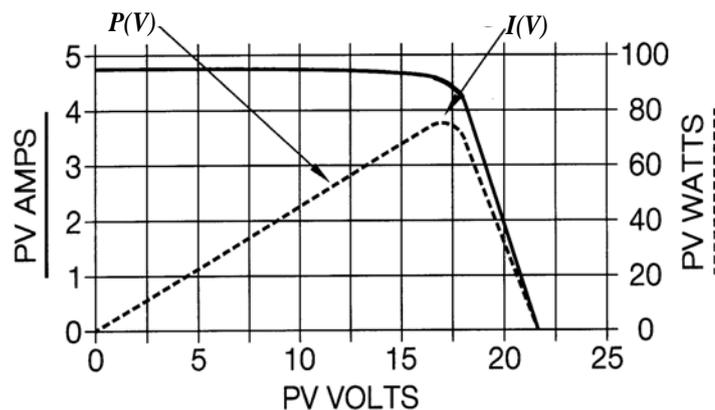


Figure (3.2) Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire [R.Cul]

3.2.2 Paramètres externes d'une cellule solaire photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [Yan.P, Jim.R] :

- **Courant de court circuit** : c'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (3.2), on obtient:

$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{R_s I_{cc}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}}$. Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible),

on peut négliger le terme $I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right)$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (3.3)$$

- **Tension de circuit ouvert** : c'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (3.4)$$

- **Puissance optimale et facteur de forme** : la puissance utile maximale $P_M = V_M I_M$ s'obtient en optimisant le produit courant tension, soit :

$$\frac{I_M}{V_M} = - \left(\frac{dI}{dV} \right) M \quad (3.5)$$

Quant au facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), il est défini par :

$$FF = \left(\frac{V_M I_M}{V_{co} I_{cc}} \right) \quad (3.6)$$

Ce facteur montre la déviation de la courbe courant–tension par rapport à un rectangle (de longueur V_{co} et largeur I_{cc}) qui correspond à la photopile idéale. Les valeurs de I_M et V_M s'obtiennent à partir des équations (3.2) et (3.5). Pour cela, on distingue deux cas :

- Si R_{sh} est infinie la dérivation mène à la résolution de l'équation non linéaire en I_M , et permet donc le calcul de V_M .
- Si R_{sh} est considérée finie, la dérivation mène à la résolution d'une équation non linéaire en V_M .

La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts-crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de 1000 W/m^2 et à une température de 25°C .

- **Le rendement** : la puissance $P = V I$ est nulle en court-circuit et en circuit-ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique I-V. Ce maximum P_M peut être déterminé en portant sur la même graphique la caractéristique I-V et les hyperboles de puissance constante. Le point de fonctionnement optimal correspond au point de tangence des deux courbes comme le montre la figure (3.4). Le rendement est :

$$\eta = \frac{P_M}{P_0} \quad (3.7)$$

Avec P_0 est la puissance incidente. Elle est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. La droite passant par l'origine et le point de puissance maximale a une pente qui correspond à la charge optimale de la photopile comme le montre la figure (3.3).

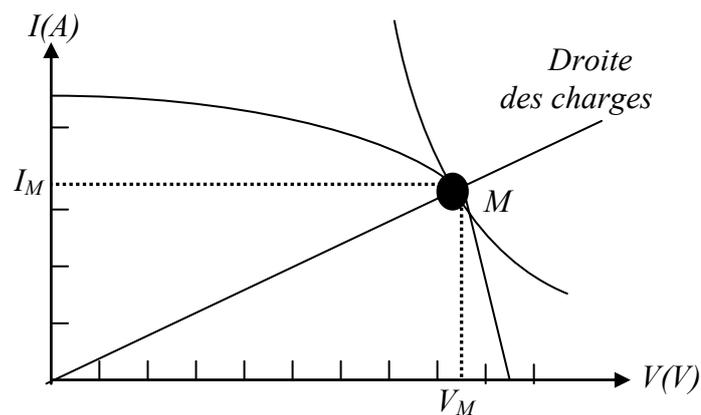


Figure (3.3) Schéma d'une cellule élémentaire

3.2.3 Influence des résistances série et shunt:

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible [Yan.P]. La figure (3.4.a) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule. La courbe en pointillés correspond à une valeur non nulle de R_s . Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe $I = f(V)$ dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension (à droite du point M de la figure (3.3)). La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.

Quant à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs de courant. La figure (3.4.b) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant (à gauche du point M de la figure (3.3)). Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

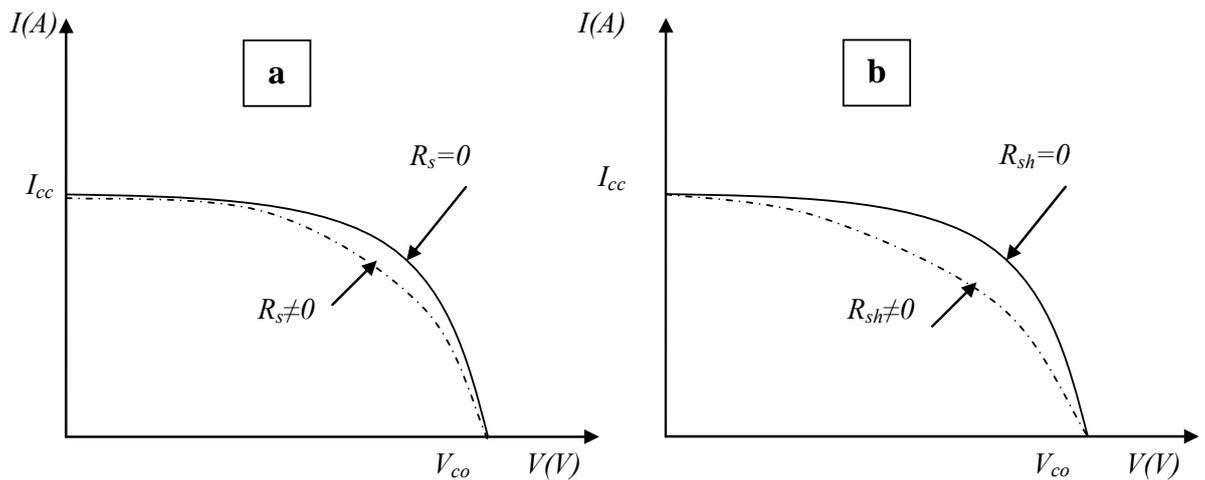


Figure (3.4) Influences des résistances séries et shunts.

3.2.4 Influence de l'éclairement :

Le photo-courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou au flux lumineux ψ . Le courant $I_d(V_d)$, étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité, et normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous une faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charges et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement. Le photo-courant créé dans une cellule solaire photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire ; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée. La figure (3.5) représente les caractéristiques $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque (jonction p-n sur du silicium monocristallin de 57mm de diamètre) à 28°C et sous diverses valeurs de l'éclairement ψ [Yan.P]. A chacune de ces valeurs de flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} suite à une chute du flux lumineux.

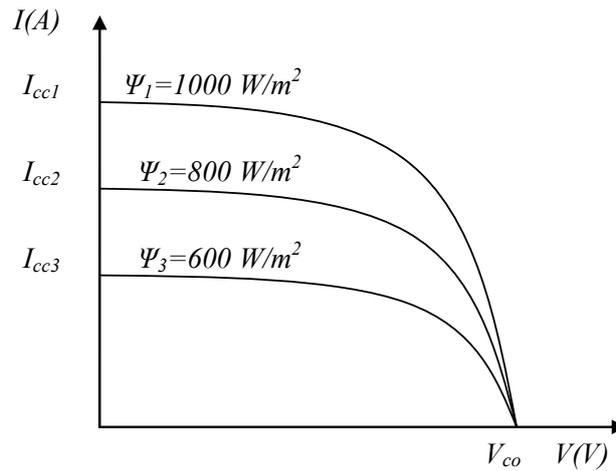


Figure (3.5) Influence de l'éclairement.

3.2.5 Influence de la température :

La température [Yan.P] est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente à peu près de $3.10^{-2} \text{ mA.K}^{-1}$ par cm^2 de cellule et par conséquent le courant I , ce qui engendre une diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} (figure (3.6)). L'augmentation de la température se traduit aussi par la diminution de la puissance maximale disponible, de l'ordre de 5.10^{-5} W/K par cm^2 de cellule, soit une variation de 0,35% par degré.

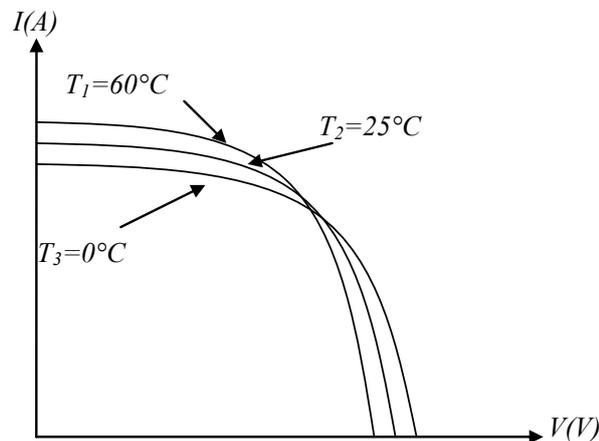


Figure (3.6) Influences de la température.

3.3 Le générateur solaire photovoltaïque :

La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules (figure (3.7)) pour obtenir des modules de puissance compatible avec le matériel usuel. Les puissances des modules disponibles sur le marché

s'échelonnent entre quelques Watts-crête et quelques dizaines de Watts-crête (1m^2 de cellules PV produit de l'ordre de 100W) [Yan.P]. Pour obtenir des puissances supérieures, il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. La courbe de fonctionnement I-V d'un module de base est une courbe se déduisant de la courbe de fonctionnement d'une cellule élémentaire par changement d'échelle sur l'axe des abscisses. Une association série-parallèle de modules solaires aura de même une courbe de fonctionnement semblable à la cellule de base, obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes. Les performances d'un générateur photovoltaïque sont déterminées à partir de ces courbes. La connaissance du profil de ces courbes caractéristiques, pour une gamme d'éclairement la plus large possible, permet d'évaluer les puissances maximales délivrées ainsi que les rendements correspondants. Pour appliquer les caractéristiques courant-tension d'un groupement de cellules qui sera en tout point homothétique de la courbe $I = f(V)$ d'une seule cellule photovoltaïque caractéristique, quelques hypothèses sont nécessaires :

- Tous les panneaux ont les mêmes caractéristiques électriques ;
- Aucune occultation partielle ;
- Aucune influence thermique.

L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série de β cellules en série et α en parallèle est la suivante [Yan.P] :

$$I = \alpha I_{sc} \left(\frac{\psi}{1000} \right) - \alpha I_0 \left(e^{\frac{q(\beta V + \frac{\beta}{\alpha} R_s I)}{\beta n k T}} - 1 \right) - \frac{\beta V + \frac{\beta}{\alpha} R_s I}{\frac{\beta}{\alpha} R_{sh}} \quad (3.8)$$

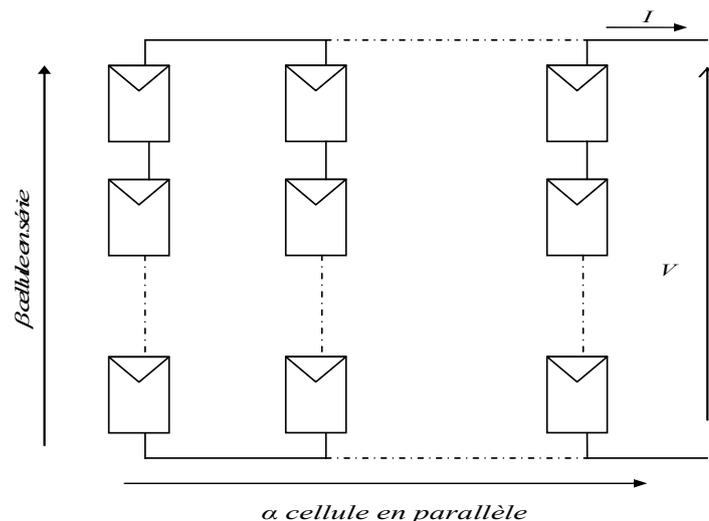


Figure (3.7) Association de α cellules solaires photovoltaïques en parallèle et β en série.

La courbe de puissance d'un groupement série-parallèle est donc analogue à la courbe de puissance élémentaire. Ainsi tout ce qui a été dit pour une cellule élémentaire, concernant son comportement en fonction du flux lumineux et de la température ou l'influence des résistances série et parallèle, ou concernant son interaction avec la charge est directement transposable au cas du groupement. Le groupement des photopiles cité ci-dessus obéit à des règles strictes à respecter :

- Il ne faut connecter en série que des cellules ayant le même courant de court-circuit $I_{cc} \cong I_{ph}$;
- Il ne faut connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension de circuit-ouvert V_{co} ;

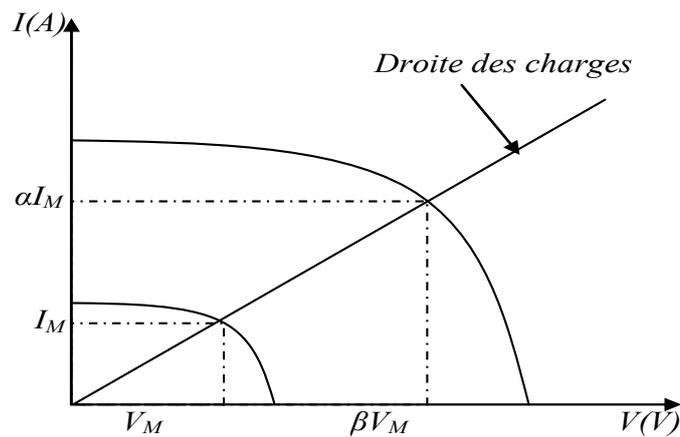


Figure (3.8) Caractéristique de α cellules solaires photovoltaïques en parallèle et β en série.

Si les paramètres électriques des photopiles associées sont dispersés et si les règles précédentes ne sont pas respectées, certaines de ces photopiles vont se comporter en récepteur, en polarisation directe ou inverse ce qui entraîne une élévation de la température de ces photopiles et peut entraîner la détérioration du module entier. Pour éviter ce problème, on procède souvent à :

- un tri de cellules avant l'encapsulation des modules photovoltaïques ;
- un emplacement des modules photovoltaïques évitant les masques naturels ou artificiels provocants de l'ombre ;
- une protection du réseau photovoltaïque par l'association de diodes.

3.4 Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque :

3.4.1 Modélisation d'une cellule solaire photovoltaïque :

Selon [Bou.O, M.Dja, L.Zar], la résistance shunt peut être négligée puisque, habituellement, elle est très grande comparée à la résistance série en particulier pour les cellules monocristallines de silicium. On aura alors le modèle de la figure (3.9) [Bou.O, M.Dja].

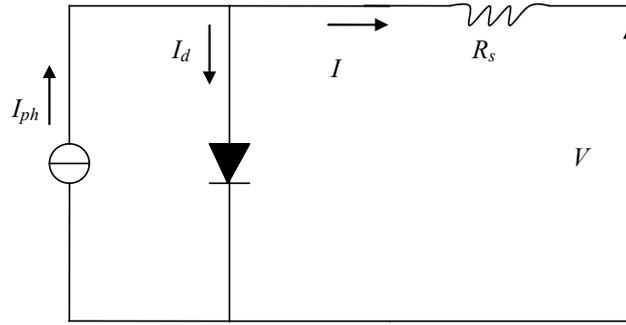


Figure (3.9) Schéma équivalent simplifié d'une cellule solaire photovoltaïque.

L'équation (3.2) devient :

$$I = I_{sc} \left(\frac{\psi}{1000} \right) - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right) \quad (3.9)$$

Selon [Bou.O, M.Dja, B.Azo], on peut écrire :

$$I = I_{sc} \cdot \left\{ 1 - C_1 \cdot \left[\exp\left(\frac{V}{C_2 \cdot V_{co}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (3.10)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_M}{I_{sc}} \right) \cdot \exp\left(\frac{-V_M}{C_2 \cdot V_{co}} \right) \quad (3.11)$$

$$C_2 = \frac{\left(\frac{V_M}{V_{co}} - 1 \right)}{\ln\left(1 - \frac{I_M}{I_{sc}} \right)} \quad (3.12)$$

avec, I et V respectivement courant et tension de la cellule photovoltaïque;

I_M et V_M respectivement courant max et tension maximale que peut générer la cellule photovoltaïque sous 25°C et 1000W/m² ;

I_{sc} : courant de court circuit de la cellule photovoltaïque à 25°C et 1000W/m².

Le modèle d'une cellule solaire photovoltaïque peut être donné comme suit :

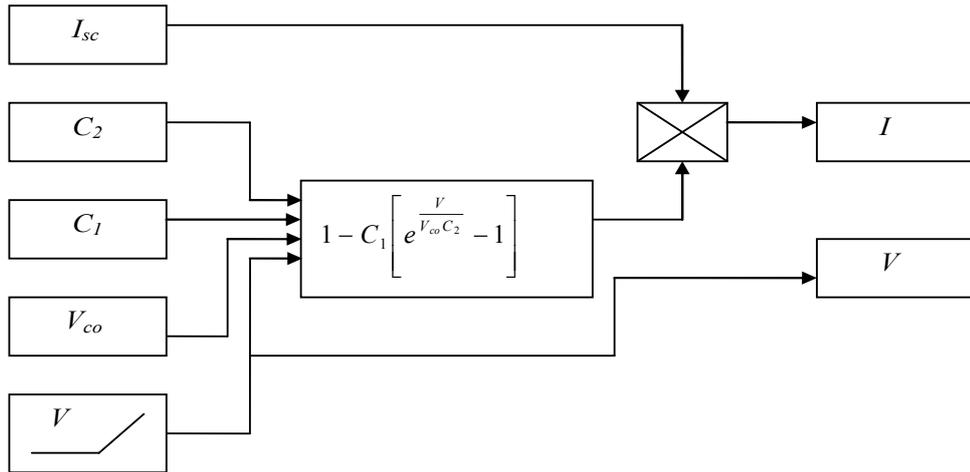


Figure (3.10) Schéma bloc du modèle de la cellule solaire photovoltaïque

Le résultat obtenu lors de la simulation sous MATLAB peut être représenté comme suit :

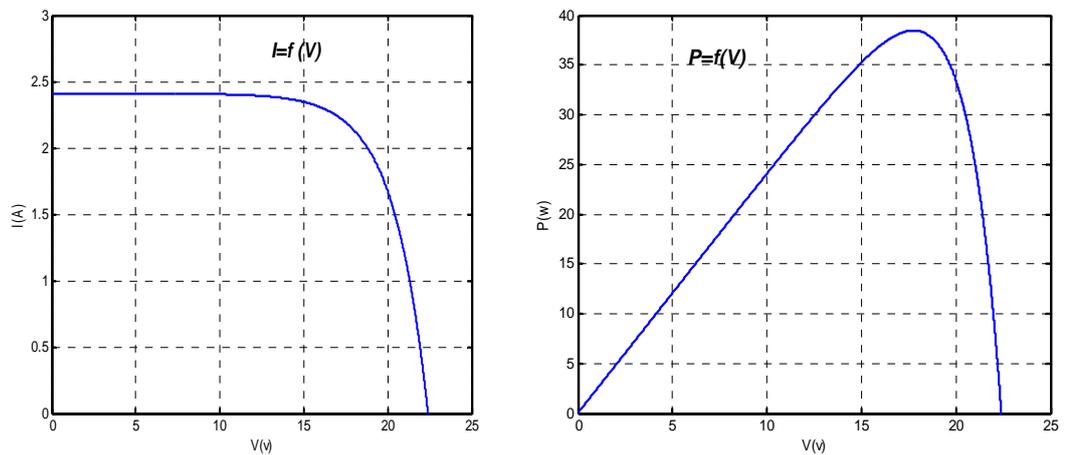


Figure (3.11) Courant et puissance d'une cellule solaire photovoltaïque en fonction de sa tension.

3.4.2 Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque :

Pour α cellule en parallèle et β cellule en série on aura [Bou.O] :

$$I_G = \alpha.I \tag{3.13}$$

$$V_G = \beta.V \tag{3.14}$$

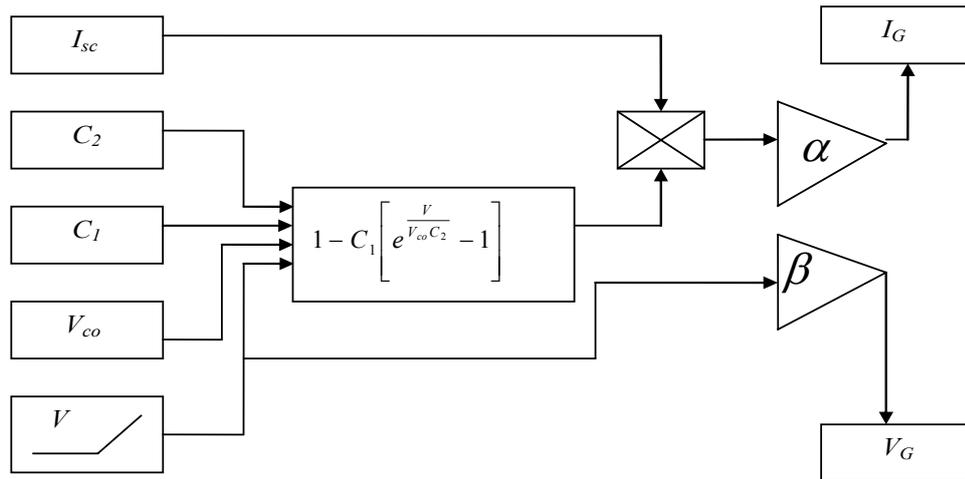


Figure (3.12) Schéma bloc du modèle d'un générateur solaire photovoltaïque

Si on suppose que $\alpha = 2$ et $\beta = 11$ on aura les résultats suivants :

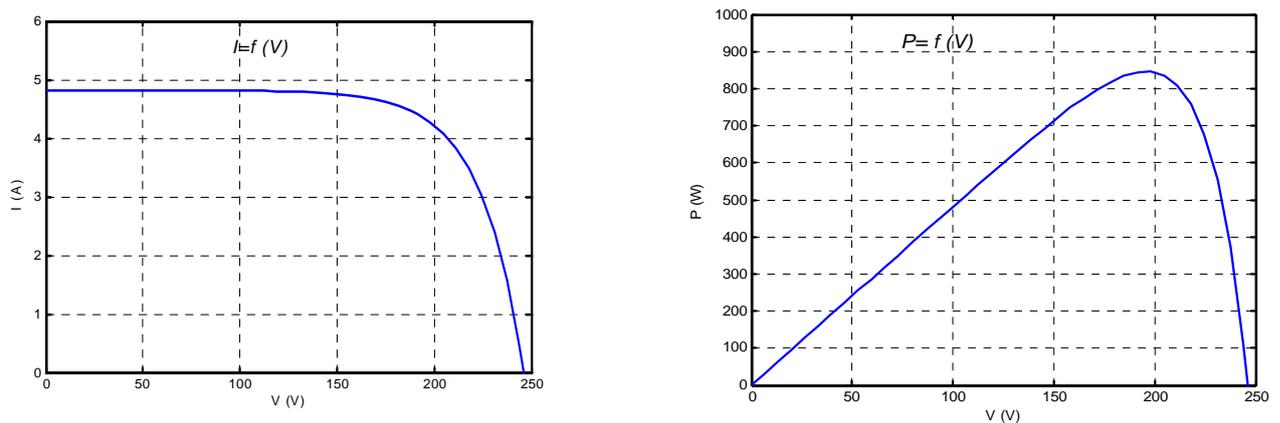


Figure (3.13) Puissance et Courant d'un générateur solaire photovoltaïque en fonction de sa tension

3.5 Définition et principe de fonctionnement de l'Mppt d'un système solaire photovoltaïque:

L'MPPT d'un système solaire photovoltaïque peut être définie comme étant une commande qui fait varier le rapport cyclique d'un convertisseur statique de telle sorte que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque soit le P_{max} disponible à ses bornes [V.Pom, L.Zar, Y.Wan]. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher la puissance maximale, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le point de puissance max en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du convertisseur statique (I et V) [Ang.C].

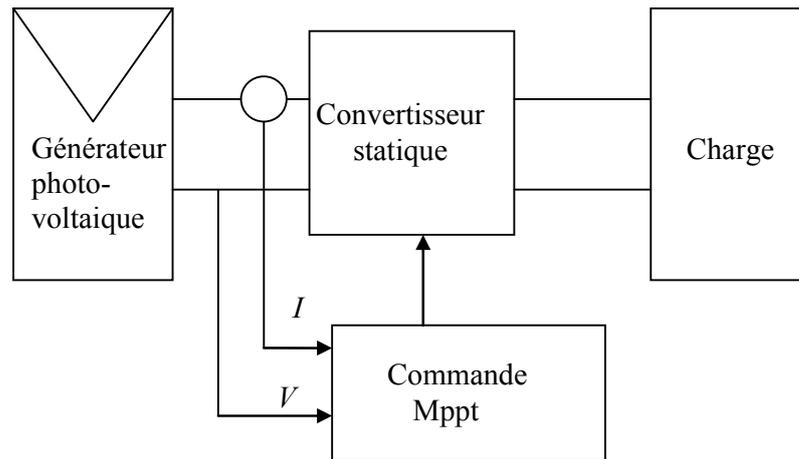


Figure (3.15) Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge quelconque

Le principe d'un contrôleur MPPT est souvent basé sur le « coude » de la caractéristique P-V [Ang.C]. C'est plus ou moins une méthode par tâtonnement, comme le montre la figure (3.16). On se place à un endroit de la courbe (X_1), et l'on regarde si la valeur du point suivant est supérieure ou non. Si oui, on se déplace au point suivant (X_2), jusqu'au moment où le terme suivant (X_n) sera inférieur au précédent (X_{n-1}). A ce moment, on prend un intervalle de valeur entre chaque point plus faible, et l'on recommence à partir de (X_{n-1}), jusqu'à obtenir le MPP(X). Cependant, ce principe, facile à réaliser semble t-il dans ces conditions, devient moins accessible lorsque l'éclairement intervient. En effet, lorsque l'intensité de l'éclairement varie, on passe ici à une valeur $E_2 < E_1$, la caractéristique P-V change. Le point X , qui était jusqu'à présent le MPP, se retrouve être un mauvais point de fonctionnement dans les nouvelles conditions, comme le montre la figure (3.16). On voit apparaître un nouveau point de fonctionnement ici appelé X' .

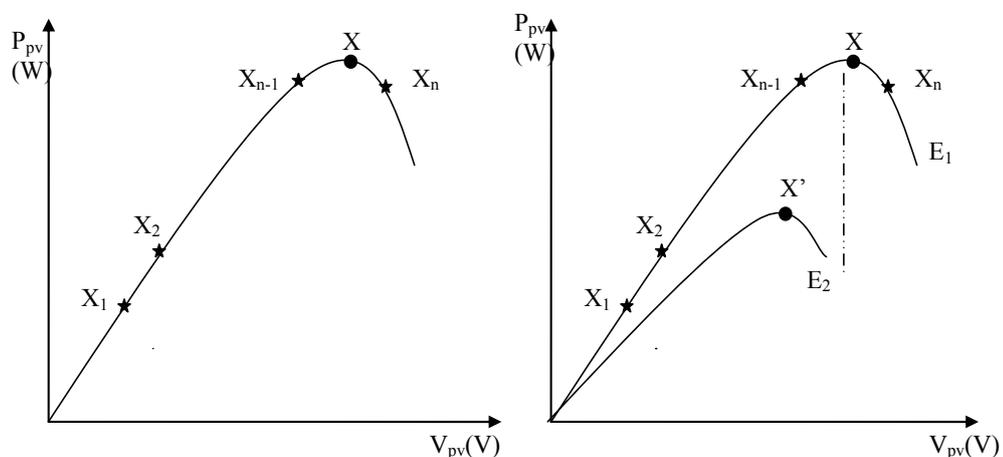


Figure (3.16) Le principe d'un contrôleur Mppt.

Comme pour les régulateurs linéaires, le contrôle est basé sur un système de régulation qui a X_s et X_e respectivement comme variables de sortie et d'entrée. Dans la plupart des systèmes de régulation, seulement une mesure est nécessaire pour connaître le rapport entre X_s et X_e , mais ce n'est pas une condition suffisante dans un système où le rapport est une fonction du temps.

Le déplacement de X_e peut être assimilé à une perturbation dans la régulation du maximum. En effet, quand le signe de la dérivée de X_s est connu, et si cela signifie que X_s s'éloigne du maximum, alors le contrôleur change le signe de la direction de X_e pour retrouver le maximum. Cette constante évolution de X_e introduit un état d'oscillation autour de la valeur maximale.

Cependant, plusieurs limites existent :

- La caractéristique P-V du générateur peut avoir plus de un maximum. Cela se produit quand beaucoup de cellules PV, avec leurs diodes de protection, sont associées en série ou en parallèle.
- Des variations brutales peuvent apparaître au niveau de l'éclairement ou de la charge. Si le MPPT n'a pas une bonne dynamique, le MPP peut être perdu. Pendant le temps qu'il faudra pour retrouver le MPP, de nouvelles pertes de puissance vont apparaître.
- Des oscillations autour du MPP existent lors de la recherche de ce point. Cela introduit des pertes.

3.6 Les différents types d'MPPT solaires photovoltaïques :

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes Mppt selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte [Ang.C, Yan.P]. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes MPPT plus ou moins complexes, nous nous centrerons sur quelques-unes représentant le mieux un type d'algorithme.

3.6.1 Les MPPT Classifiés selon les paramètres d'entrés :

- **MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS :** il y a un certain nombre d'MPPT qui effectuent une recherche du point de puissance maximale selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Dans la littérature, nous pouvons retrouver différents types d'algorithmes basés sur des commandes extrémales (dans la littérature anglo-saxonne nommé Perturb&Observe) présentant plus ou moins de précisions [V.Sal, P.Mid], ou les algorithmes d'incrément de conductance [V.Sal], qui utilisent aussi la valeur de la puissance fournie par le générateur PV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du point de

puissance maximale. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction. D'autres types de commandes MPPT sont basés sur la régulation du courant du générateur PV, supposant que ce dernier soit une image proportionnelle à P_{max} . Ceci permet de s'approcher le plus proche possible du courant optimal I_{opt} . Pour cela, une des variantes de ce type de commande calcule un courant de référence dérivé directement du I_{cc} du générateur PV. Cela nécessite que le système effectue un court-circuit du générateur PV périodiquement pour effectuer la mesure. Ensuite, à partir d'une relation de proportionnalité plus ou moins complexe, on peut obtenir la référence du courant du générateur PV qui doit être proche du courant optimal souhaité [T.Wu]. Ce type de commande ayant besoin uniquement d'un capteur, s'avère plus facile à mettre en oeuvre et un peu moins coûteux que les commandes extrémales. Par contre, la précision de ces commandes est faible notamment à cause du procédé d'estimation de I_{cc} qui ne peut pas se faire trop souvent. L'échelle temporelle de réaction est en effet de la minute. De plus, à chaque fois que la mesure de courant est faite, cela entraîne un arrêt obligatoire de transfert de puissance et donc des pertes énergétiques qui ne sont pas négligeables au cours d'une journée. Ces commandes sont destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où la météo garantit très peu de changements climatiques. D'autres auteurs [N.Gue, V.Sal] déduisent la puissance optimale de la tension optimale V_{opt} et cela à partir de la tension de circuit ouvert du générateur PV en effectuant des estimations plus ou moins précises. Pour ce faire, une fraction constante de la tension en circuit ouvert est utilisée comme référence pour la tension du générateur PV. D'autres se servent de méthodes assistées par ordinateur pour calculer la puissance fournie par le générateur PV à partir de la tension de celui-ci [V.Sal]. Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones ; dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives.

- MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur : dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des convertisseurs statiques. Par exemple sur [C.Sul], il est exposé un algorithme MPPT qui maximise le courant de charge d'une batterie. D'un autre côté, dans [D.Shm], sont présentées différentes stratégies de commandes MPPT basées sur les paramètres de sortie du convertisseur. Dans ce mémoire, il a été étudié analytiquement et expérimentalement la réalisation d'une commande MPPT avec un seul des paramètres de sortie soit la tension de sortie du convertisseur statique, soit son courant. Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

3.6.2 Les MPPT classifiés selon le type de recherche ou contrôle :

Indépendamment des paramètres d'entrée de l'algorithme MPPT, nous pouvons trouver dans la littérature différents types d'MPPT. Certaines d'entre elles sont basées sur la commande qui essaye de faire « monter » le point de fonctionnement du générateur PV le long de la caractéristique $P(V)$ jusqu'à atteindre le point de puissance maximale. Dans ce type de méthodes, nous pouvons distinguer les méthodes basées sur l'incrément de conductance et les méthodes P&O (Perturb & Observe) [Ang.C]. La commande Perturb & Observe [V.Sal, Ang.C] impose toujours une oscillation autour du point de puissance maximale. En effet, cette oscillation est nécessaire pour connaître les variations de la puissance de sortie du générateur PV et ainsi réajuster le rapport cyclique du convertisseur statique en faisant en sorte que le point de fonctionnement du générateur PV oscille le plus près possible du point de puissance maximale, même si les conditions de fonctionnement sont inchangées. Cela entraîne des pertes en régime établi mais qui sont largement rattrapées en fonctionnement dynamique (lors de transitoires). En effet, ces commandes réagissent très vite à tout changement sans en savoir l'origine. D'autre part, le type de commande MPPT nommé algorithme d'incrément de conductance [V.Sal, Ang.C], se base sur la dérivée de la conductance du générateur PV pour connaître la position relative du point de puissance recherchée et enfin pour appliquer une action de contrôle adéquate au suivi de ce point. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du générateur PV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du générateur PV le plus près possible du point de puissance maximale [V.Sal]. Parfois, les algorithmes établissent des approximations afin que le point d'opération du générateur PV soit le plus proche possible du point de puissance maximale, nous parlons alors des méthodes complexes assistées par ordinateur. Par exemple celle basées sur la technique de commande nommée logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy control) [V.Sal, Ang.C].

3.7 Modélisation et implantation d'un simulateur solaire photovoltaïque :

Pour reproduire la caractéristique ($V(\text{tension}), P(\text{Watt})$) d'un générateur solaire photovoltaïque et valider les résultats obtenus par simulation expérimentalement, on va utiliser un système nommé simulateur solaire photovoltaïque (reproducteur de comportement d'un générateur photovoltaïque) et qui peut être assimilé à une source de tension avec résistance interne, voir le schéma ci-dessous :

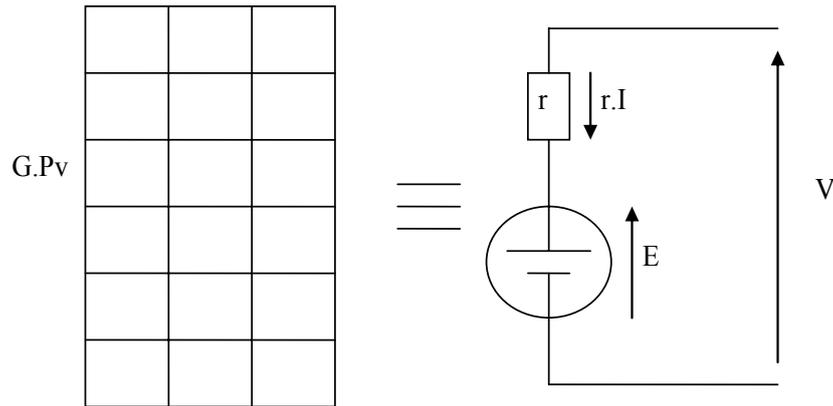


Figure (3.17) Schéma de principe d'un simulateur solaire photovoltaïque

Avec plusieurs tensions d'alimentation $E = 25, 20, 15$ et $10V$, résistance interne $r_{int} = 5\Omega$, résistance de charge (R_{ch}) variable et la réalisation de l'installation illustrée dans la figure (3.17) on obtient le résultat suivant :

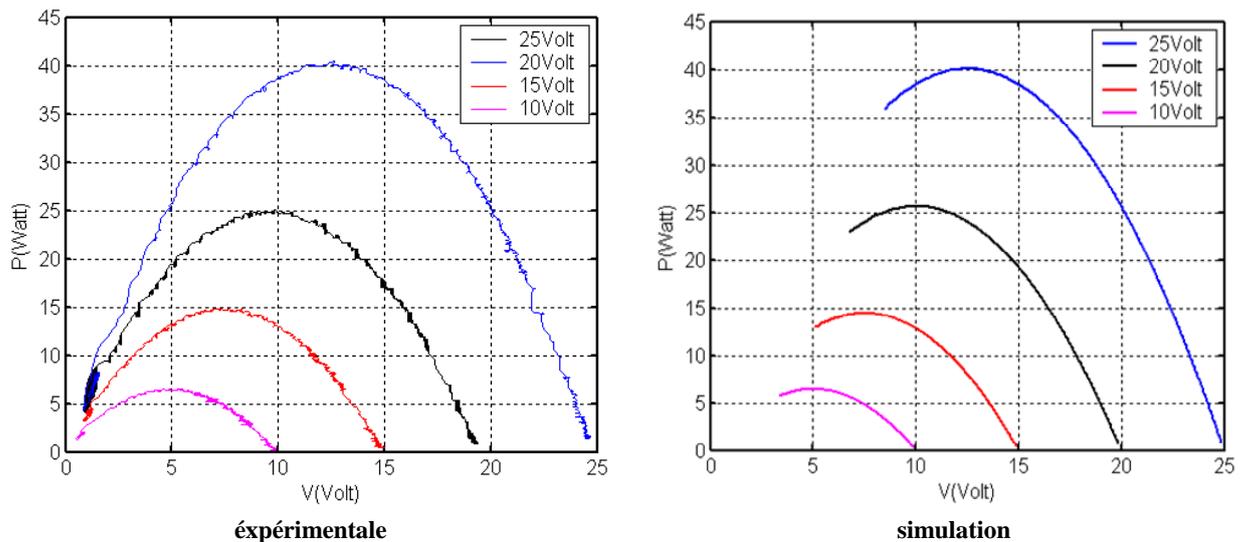


Figure (3.18) Puissance en fonction de la tension d'un simulateur solaire

Comme on peut le remarquer (Figure 3.18), la puissance est maximale quand les deux résistances (r et R_{ch}) sont en égalité. Pour $E=25V$, la puissance atteint un maximum de $25/2=12.5V$, de même pour les autres valeurs de E .

3.8 Conclusion :

Ce chapitre a permis le survol de tout ce qui a trait aux systèmes solaires photovoltaïques sans batterie, ainsi caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque et modélisation d'une cellule et d'un générateur photovoltaïque sont donnés. un point important entamé en fin de ce chapitre est l'MPPT permettant d'extraire le maximum de puissance d'un système photovoltaïque.

CHAPITRE 4:

L'MPPT D'UN SYSTEME DE GENERATION HYBRIDE

SOLAIRE-EOLIEN : PRINCIPE ET IMPLANTATION

4.1 Introduction

L'MPPT qui signifie maximisation de la puissance extraite, est un facteur primordial pour l'amélioration du rendement d'un système. Les systèmes éoliens à axe horizontal et solaire photovoltaïque sont de puissances (grandeurs de sorties) variables car leurs grandeurs d'entrées sont variables, pour cela un algorithme d'MPPT qui suit la puissance maximale est indispensable.

Ce chapitre est dédié à l'implantation expérimentale de l'MPPT pour un système hybride solaire éolien. Pour ce faire, en premier lieu on décrira le banc d'essai avec les différents convertisseurs utilisés, on expliquera ensuite les MPPTs proposés pour chaque système (solaire, éolien et solaire-éolien) et finalement seront exposés et interprétés les résultats obtenus.

4.2 Description du banc d'essai

Le banc d'essai expérimental sur lequel ont été testés les différents algorithmes de commande proposés se compose des éléments suivants :

- Une carte dSPACE 1103 : c'est une carte intégrée dans un microordinateur, gérée l'intermédiaire de CONTROL DESK (c'est une interface graphique permettant une interactivité simple avec la structure de commande. Il permet la visualisation le stockage et le traitement en temps réel des grandeurs physiques mesurées. Il permet aussi le démarrage, l'arrêt d'un programme ou le changement des paramètres de la commande (consignes, paramètres de contrôle, ...etc.). Cette carte comporte un DSP maître à virgule flottante, le Motorola Power PC 604e (processeur particulièrement puissant et parfaitement adapté à ce type d'expérimentation temps réel), un DSP esclave de Texas Instruments pour la commande par MLI, des convertisseurs analogique-numérique 12 et 16 bits ainsi que des convertisseurs numérique-analogique, une

interface pour codeur incrémental et des entrées/sorties logiques. La carte dSPACE 1103 gère les entrées-sorties numériques avec un niveau de tension de 0-5 V (pour plus d'informations voir Annexe III) ;

- Un ordinateur Pentium III « 566 Mhz » équipé de Matlab/Simulink et Control Desk.
- Carte de mesure des courants et tensions : C'est une carte de mesure chargée de la capture des différentes grandeurs électriques requises par le système. Les capteurs de tensions et de courants utilisés sont respectivement les LEM LV 25-P et les LEM LA 25- NP. La carte est capable de capter deux courants et deux tensions. La famille des LEM repose sur la compensation du champ magnétique. Le champ magnétique généré par le courant à mesurer est compensé par un champ créé par le bobinage secondaire, qui incorpore une sonde à effet Hall, associée à un circuit électronique de compensation. Le courant mesuré est l'image du courant de l'enroulement primaire au facteur près du rapport de nombre de spires des deux enroulements ;
- Les convertisseurs (redresseur triphasé, hacheurs) ;
- Une source de tension alternative triphasée en vue d'alimenter le redresseur triphasé et une autre à courant continu ;
- Un moteur à courant continu à excitation séparée de 1kWatt (pour plus de détails voir Annexe II) ;
- Une génératrice à courant continu à excitation séparée de 1kWatt (pour plus de détails voir Annexe II) ;
- Un capteur de vitesse (tachy génératrice), disposé sur le même alignement de l'axe du moteur-générateur ;
- La charge (résistances électriques).



Figure (4.1) Vue de l'ensemble du banc d'essai

4.3 Les convertisseurs utilisés

Les convertisseurs utilisés ce sont les convertisseurs continu–continu nommés aussi hacheurs. Les hacheurs série, parallèle et série-parallèle sont des outils qui rendent la tension moyenne de sortie U_s inférieur, supérieur et égale respectivement à celle de l'entrée U_e et cela pour un rapport cyclique $\alpha = 0.5$.

4.3.1 Essai d'un hacheur parallèle

Avec une tension d'entrée $U_e = 30V$, rapport cyclique $\alpha = 0.5$, résistance de charge $R_{ch} = 320\Omega$, condensateur de filtrage $C_f = 250\mu F$, inductance $L = 0.0108H$ et la réalisation de l'installation illustrée dans la figure (1.6), on aura le résultat suivant :

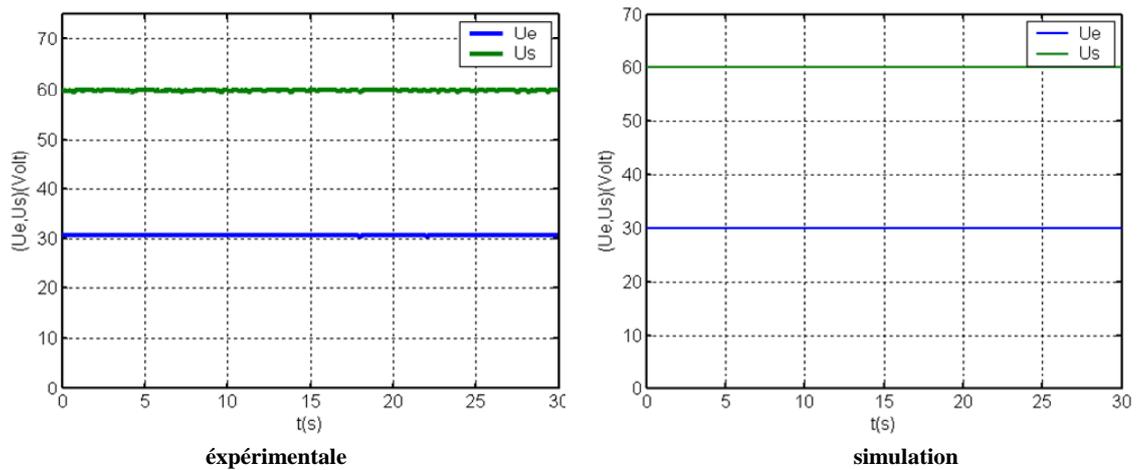


Figure (4.2) Tension d'entrée et de sortie d'un hacheur parallèle

4.3.2 Essai d'un hacheur série

Avec une tension d'entrée $U_e = 60V$, rapport cyclique $\alpha = 0.5$, résistance de charge $R_{ch} = 320\Omega$, condensateur de filtrage $C_f = 250\mu F$ et la réalisation de l'installation illustrée dans la figure (1.5), on aura le résultat suivant :

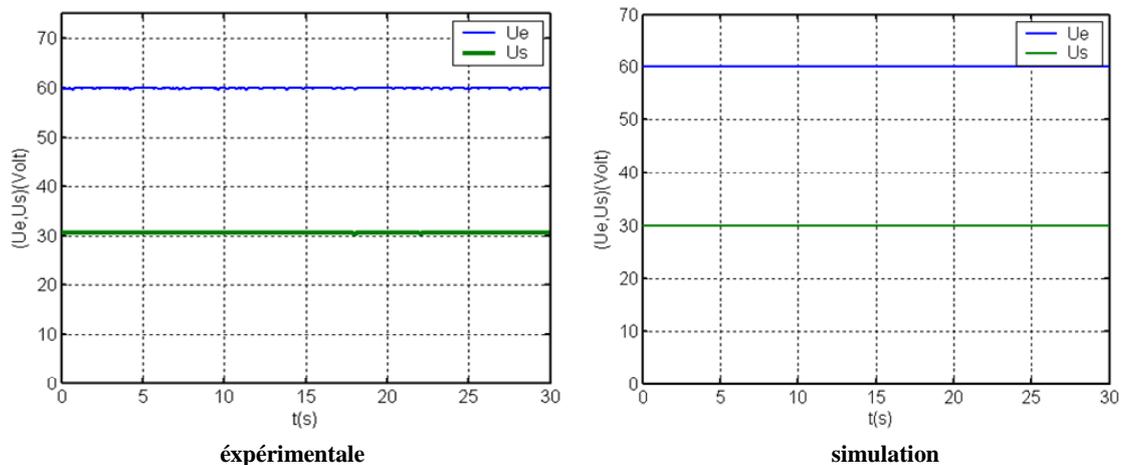


Figure (4.3) la tension d'entrée et sortie d'un hacheur série.

4.3.3 Essai d'un hacheur série-parallèle

Avec une tension d'entrée $U_e = 60V$, rapport cyclique $\alpha = 0.5$, résistance de charge $R_{ch} = 320\Omega$, condensateur de filtrage $C_f = 250\mu F$, inductance $L = 0.0108H$ et la réalisation de l'installation illustrée dans la figure (1.7), on aura le résultat suivant :

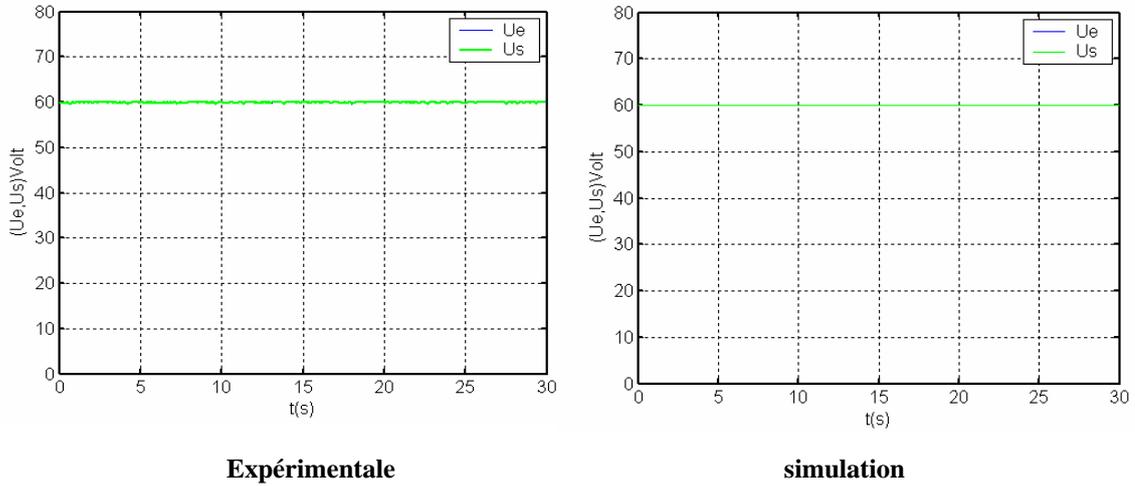


Figure (4.4) Tension d'entrée et de sortie d'un hacheur série-parallèle

4.4 L'MPPT du système solaire proposé

Deux MPPT sont proposés dans ce travail, le premier MPPT est à puissance de référence et le deuxième avec un régulateur itératif.

4.4.1 L'MPPT à tension de référence

L'MPPT à puissance de référence est un algorithme simple, basé sur des données fournies par le constructeur ou obtenues par mesures réalisées par l'utilisateur. On aura alors pour Ψ (l'éclairement) et T (la température) donnés, U_{ref} (la tension de référence) pour laquelle la puissance du générateur photovoltaïque est maximale. Un tel MPPT peut être schématisé comme suit :

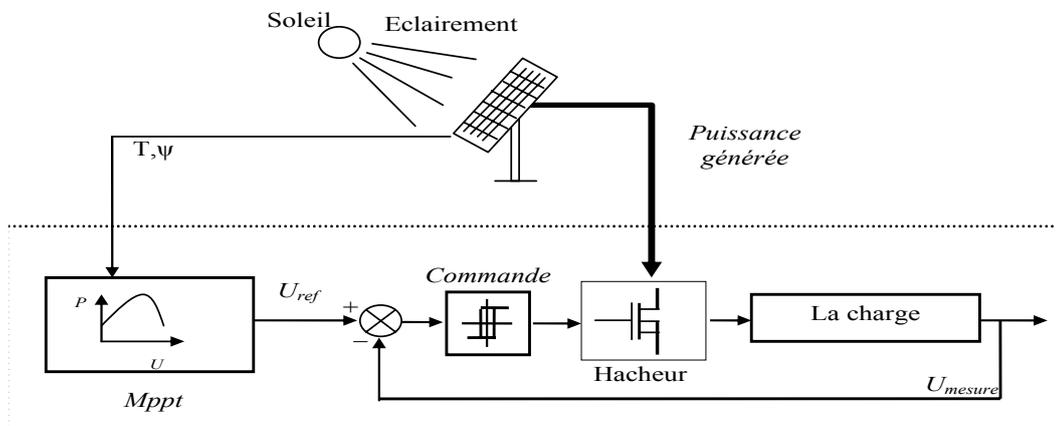


Figure (4.5) Principe de l'Mppt à tension de référence pour le système solaire photovoltaïque.

Avec plusieurs tensions d'alimentation $E = 30, 25$ et $20V$ correspondant respectivement aux tensions de références $15, 12.5$ et $10V$, résistance interne $r_{int} = 11\Omega$, charge (R_{ch}) variable, comme le montre la figure (4.6), l'utilisation d'un hacheur parallèle et la réalisation de l'installation illustrée dans la figure (4.5), on aura les résultats expérimentaux suivants :

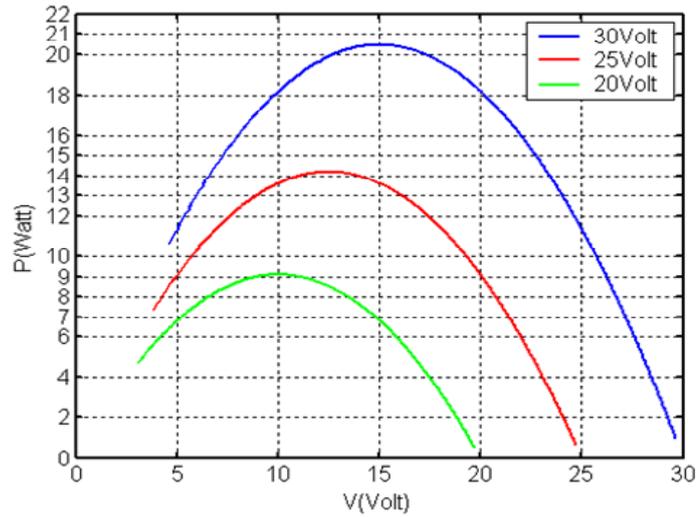


Figure (4.6) Puissance en fonction de la tension du simulateur solaire

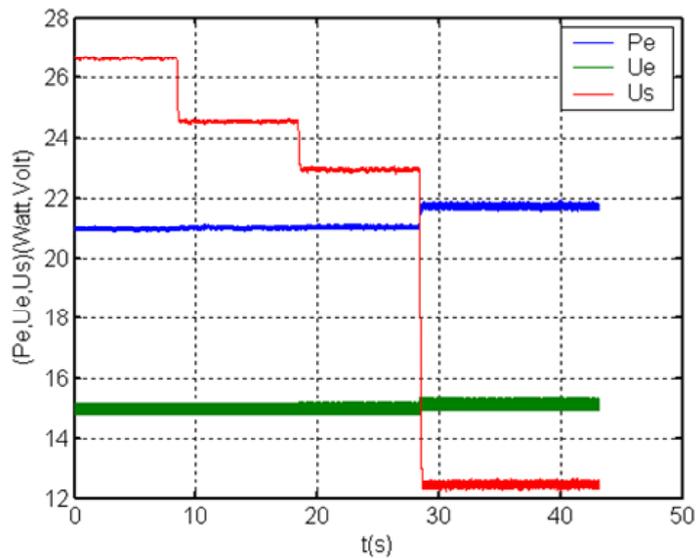


Figure (4.7) Puissance d'entrée (P_e), tensions d'entrée (U_e) et sortie (U_s) du système solaire en fonction du temps ($E=30V$).

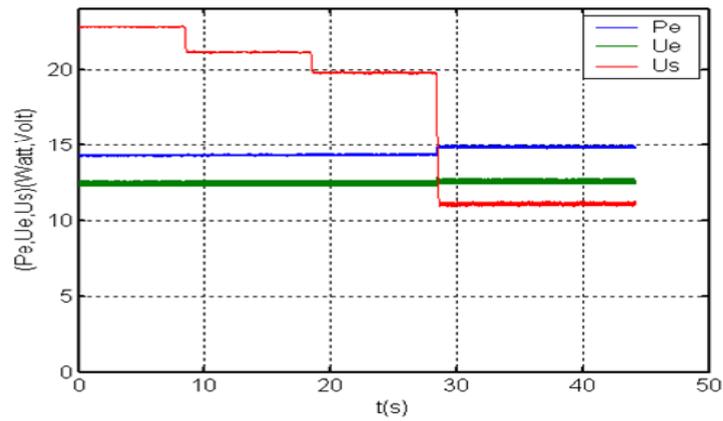


Figure (4.8) Puissance d'entrée (P_e), Tensions d'entrée (U_e) et sortie (U_s) du système solaire en fonction du temps ($E=25\text{Volt}$).

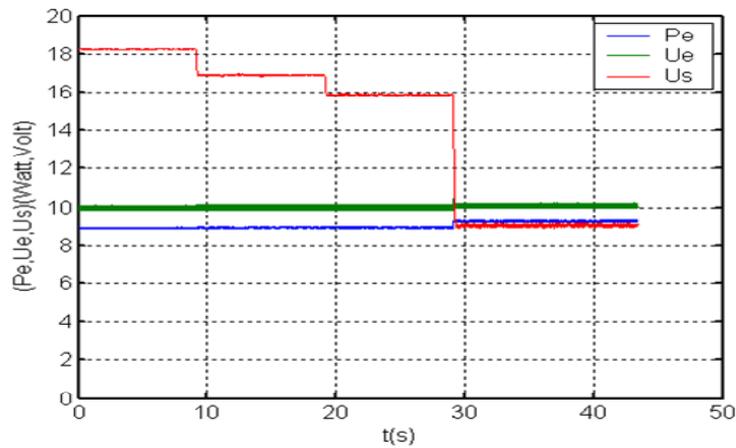


Figure (4.9) Puissance d'entrée (P_e), Tensions d'entrée (U_e) et sortie (U_s) du système solaire en fonction du temps ($E=20\text{Volt}$).

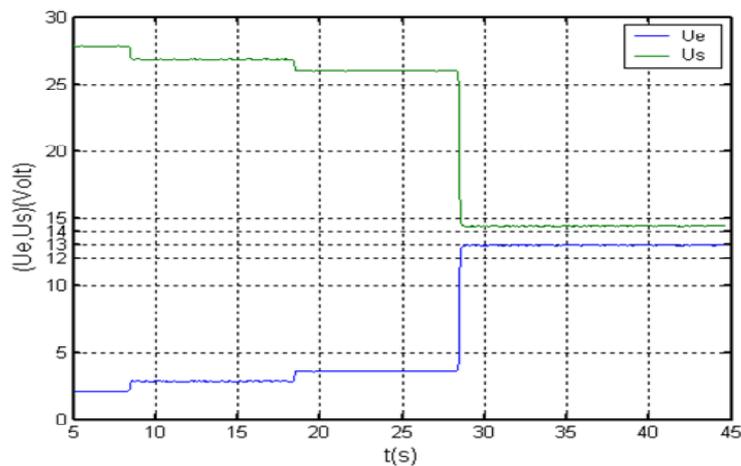


Figure (4.10) Tension d'entrée (U_e) et sortie (U_s) du système solaire sans MPPT en fonction du temps ($E=30\text{Volt}$).

4.2.2 L'Mppt avec un régulateur itératif

L'Mppt à régulateur itératif est un algorithme d'origine perturb & observe, basé sur la variation du rapport cyclique α et cela pour la recherche de la puissance d'entrée max. cette algorithme peut être expliqué par les deux figures ci-dessous :

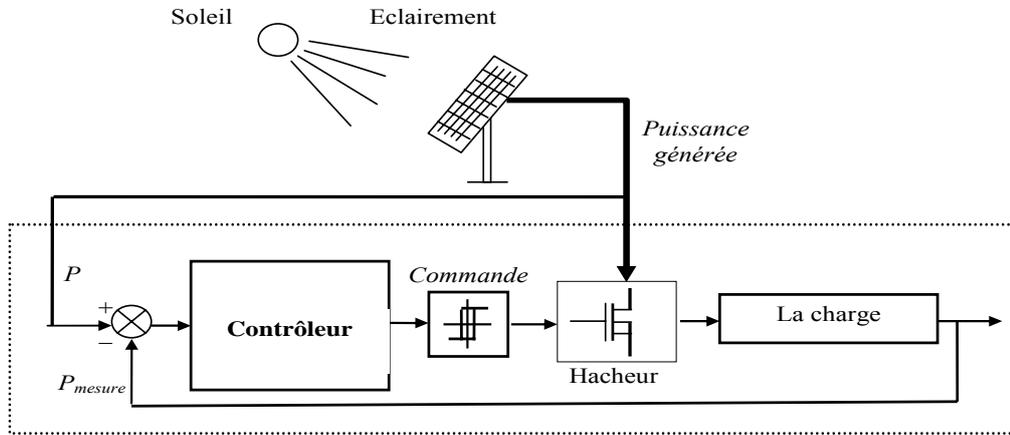


Figure (4.11) Principe de l'MPPT avec un régulateur itératif pour le système solaire photovoltaïque

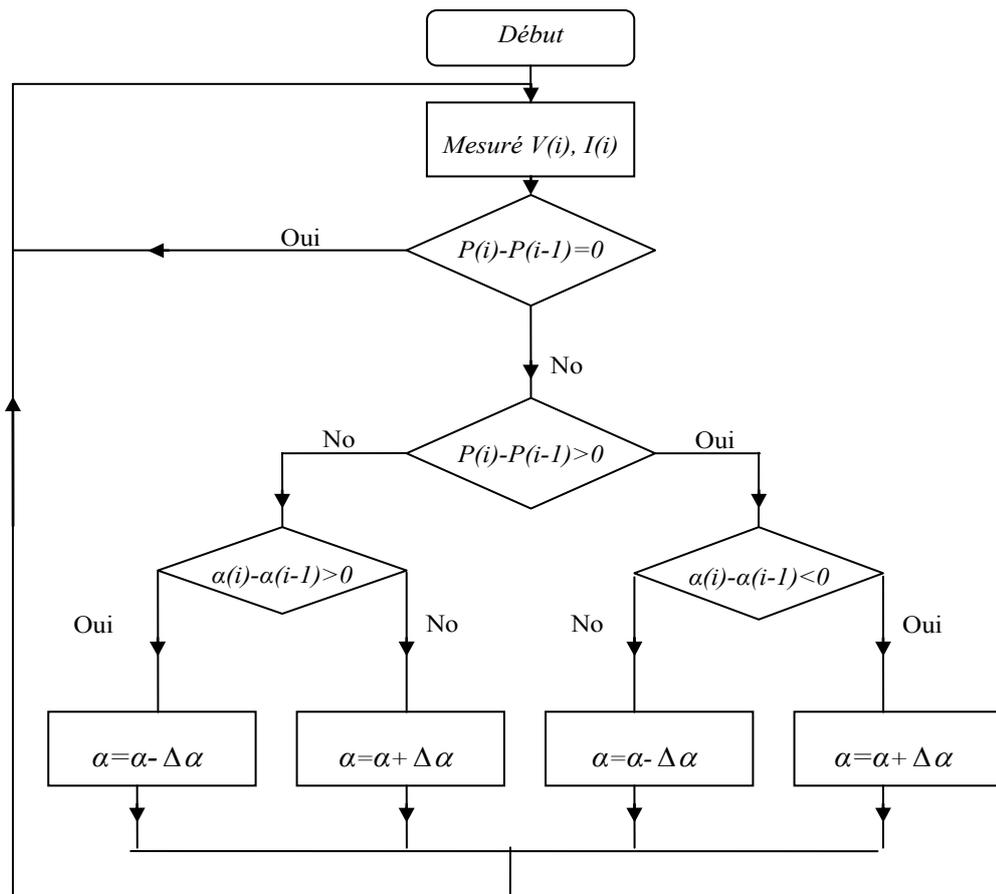


Figure (4.12) Organigramme de l' MPPT à régulateur itératif

Avec une tension d'alimentation $E = 30V$, résistance interne $r_{int} = 4\Omega$, charge (R_{ch}) variable, pour une puissance d'entrée P_e de référence de $47.5W$ comme le montre la figure (4.13), l'utilisation d'un hacheur série-parallèle et la réalisation de l'installation de la figure (4.11), on aura les résultats expérimentaux suivants :

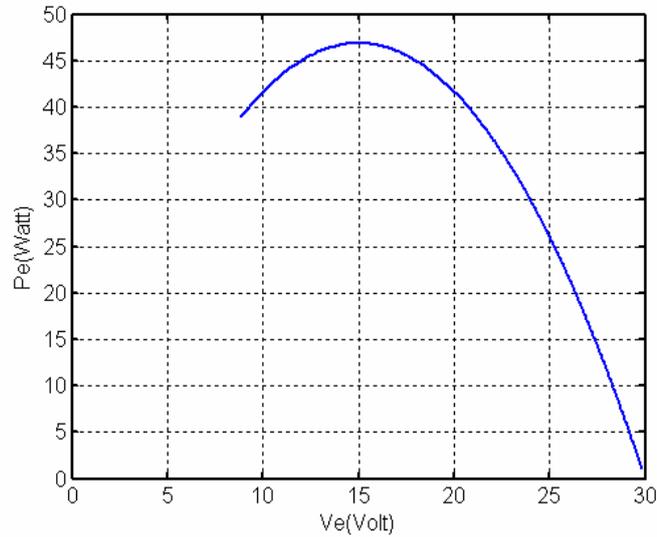


Figure (4.13) la puissance en fonction de la tension du simulateur solaire

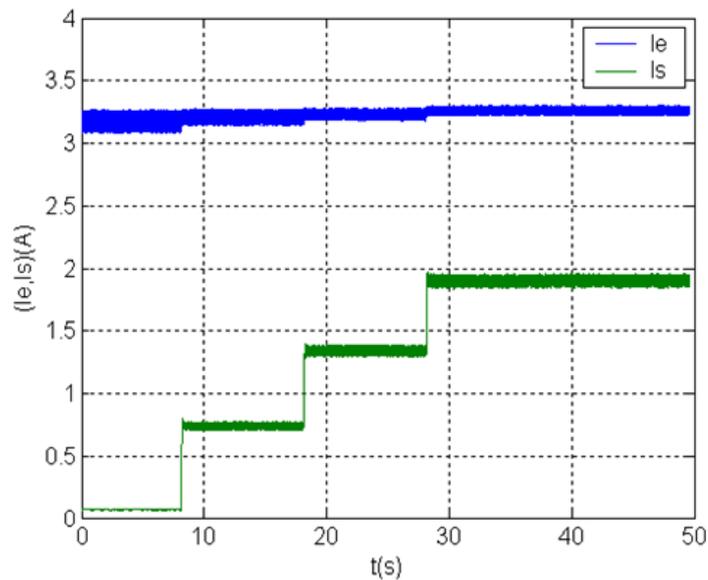


Figure (4.14) Courants d'entrée (I_e) et de sortie (I_s) du système solaire en fonction du temps ($E=30V$).

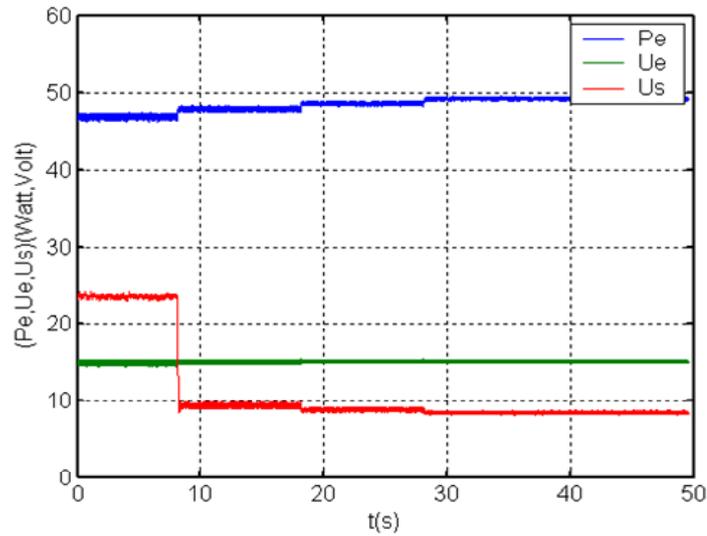


Figure (4.15) Puissance d'entrée (P_e), Tensions d'entrée (U_e) et de sortie (U_s) du système solaire en fonction du temps ($E=30\text{Volt}$).

4.5 L'MPPT du système éolien proposé

Si on suppose que la génératrice est idéale, donc quelque soit la puissance générée, le couple électromagnétique C_{em} développé est à tout instant égal à sa valeur de référence C_{em-ref} , la technique d'extraction du maximum de puissance utilisée ici consiste à déterminer la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$ qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. La vitesse de la génératrice Ω qui égale à $\Omega_{turbine}$ (pas de multiplicateur dans notre cas) est influencée par l'application de trois couples : le couple éolien C_g , le couple électromagnétique C_{em} et le couple résistant C_r .

Cette structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine C_{aer} de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, l'utilisation d'un asservissement de la vitesse est indispensable (asservissement à hystérésis). La référence de la vitesse de la turbine est celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse λ_{Cpmax} (β constant) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p . Alors on peut écrire :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{Cpmax} \cdot V}{R} \quad (4.1)$$

avec,

- V : la vitesse du vent ;
- R : la longueur de la pale.

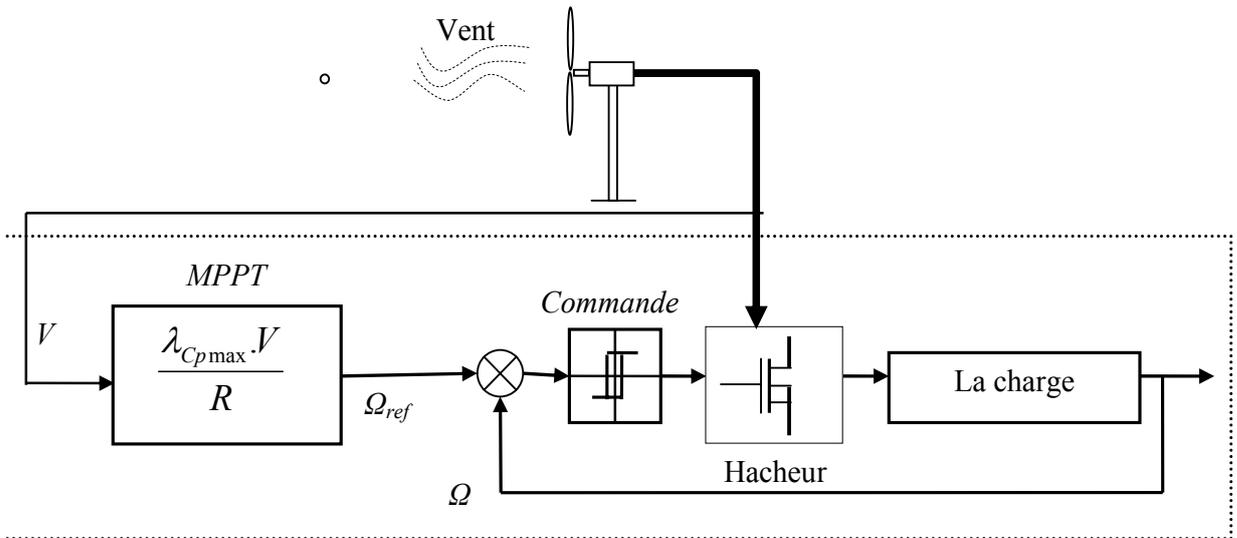


Figure (4.16) Principe de l'MPPT proposé pour le système éolien

Avec une tension d'excitation et alimentation induit du moteur à courant continu à excitation séparée respectivement $U_{ex} = 220V$ et $E_a = 150V$, tension d'excitation de la génératrice $U_{exg} = 160V$, une charge variable, un hacheur série-parallèle et la réalisation de l'installation illustrée dans la figure (4.16), on aura le résultats expérimentaux suivants :

- a) A une vitesse du vent constante :

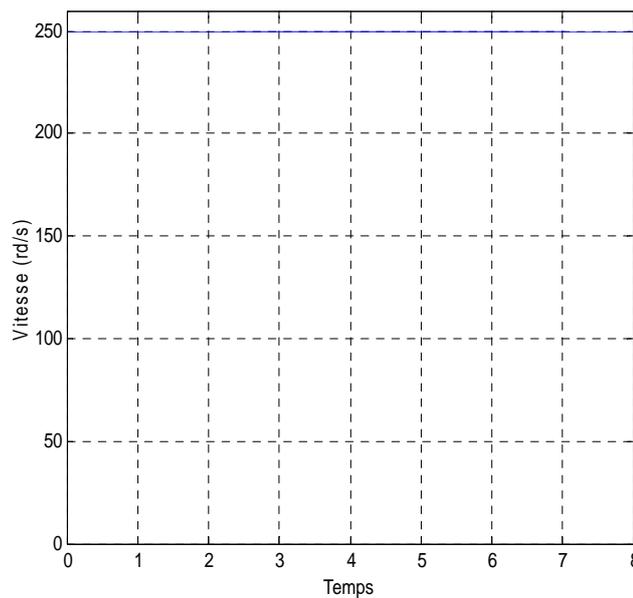


Figure (4.17) Vitesse du vent constante pour le système éolien

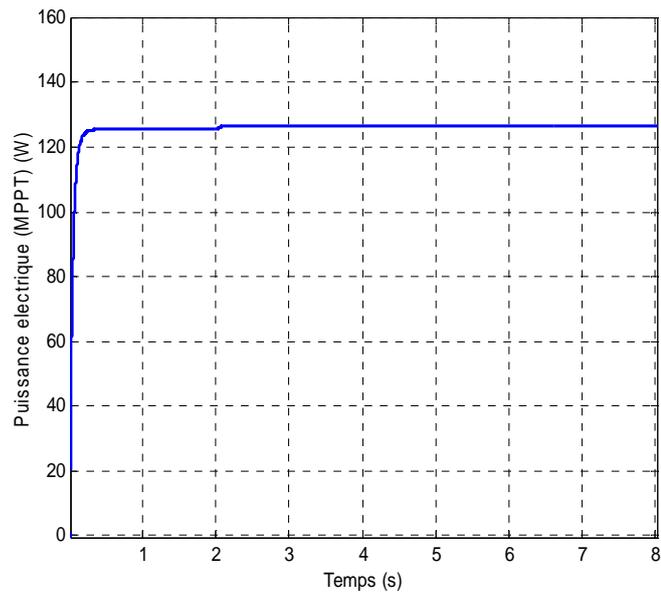


Figure (4.18) Puissance électrique d'entrée résultante du système éolien en fonction du temps

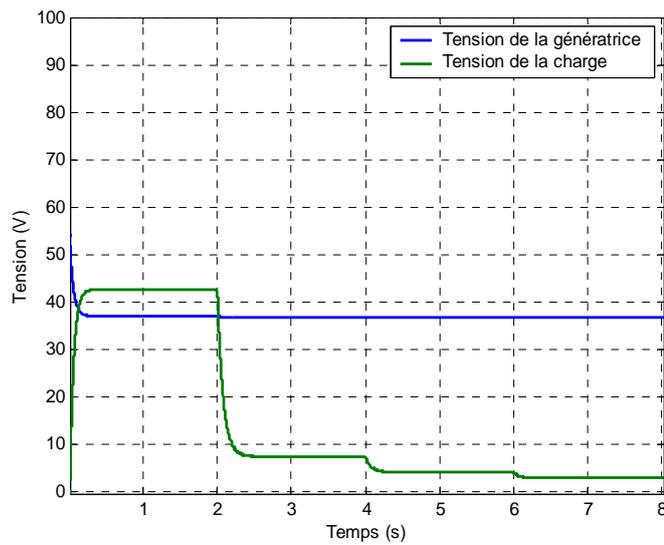


Figure (4.19) Tensions de la génératrice et de la charge résultantes du système éolien en fonction du temps.

b) A une vitesse du vent variable :

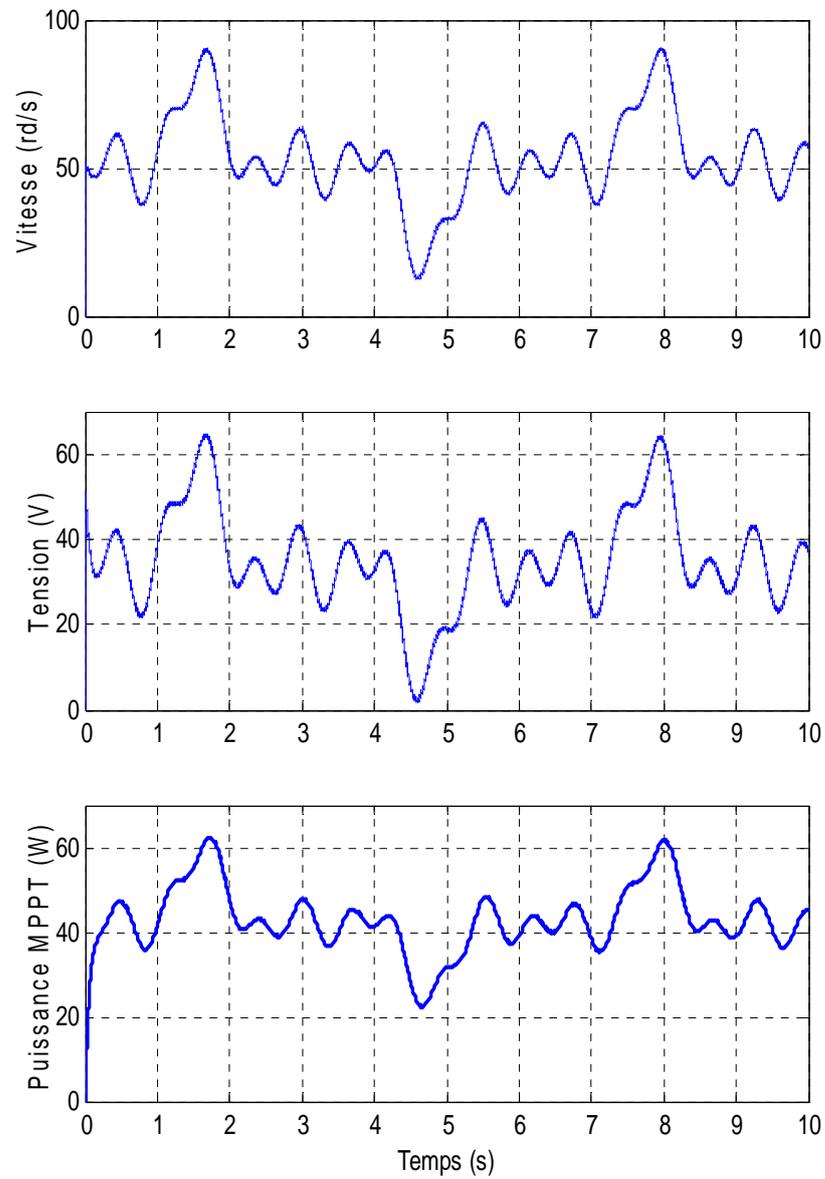


Figure (4.20) Vitesse, tension et puissance d'un système éolien avec son Mppt en fonction du temps.

4.6 L'MPPT d'un système de génération hybride solaire-éolien

D'après notre vision l'MPPT d'un système de génération hybride solaire-éolien peut être de deux types :

4.6.1 L'MPPT d'un système de génération hybride solaire-éolien parallèle

Le système solaire-éolien parallèle peut être architecturé comme suit :

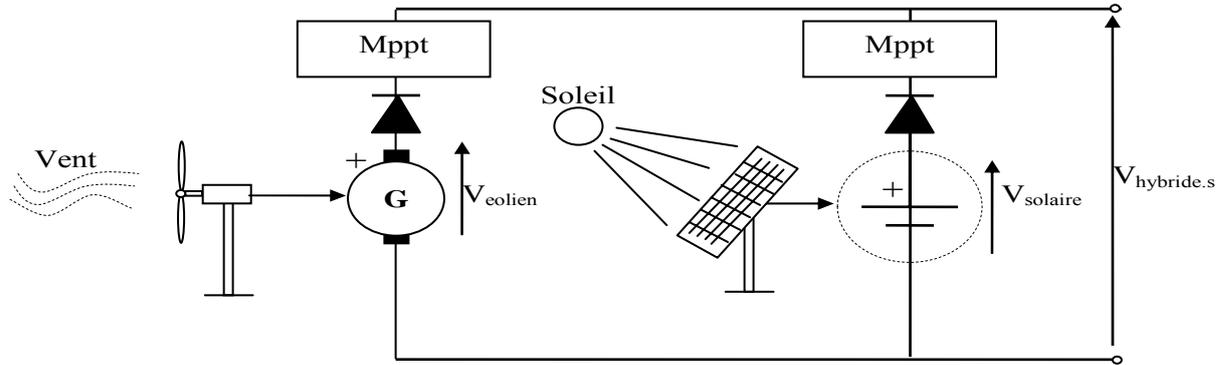


Figure (4.21) Schéma de principe d'un système de génération hybride solaire-éolien parallèle

tel que V_{eolien} est la tension du générateur éolien, $V_{solaire}$ est la tension du générateur solaire et $V_{hybride.p}$ est la tension des deux générateurs en parallèle au même temps.

$$V_{hybride.p} = \begin{cases} V_{solaire} & \text{if } (V_{solaire} \geq V_{eolien}) \\ V_{eolien} & \text{if } (V_{solaire} \leq V_{eolien}) \end{cases} \quad (4.3)$$

Avec une tension d'excitation et alimentation induit du moteur à courant continu à excitation séparée $U_{ex} = 220V$ et $E_a = 150V$ respectivement, tension d'excitation de la génératrice $U_{exg} = 200V$; avec une tension d'alimentation $E = 120$ (Volt), résistance interne $r_{int} = 4\Omega$, pour une charge résistive variable, l'utilisation d'un hacheur série-parallèle et la réalisation de l'installation illustrée dans la figure (4.21), on aura les résultats expérimentaux suivants :

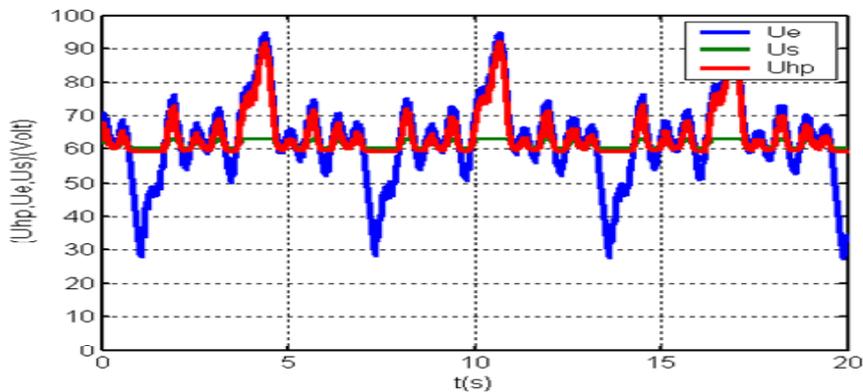


Figure (4.22) Tensions d'entrée éolien (U_e) et solaire (U_s) et hybride parallèle (U_{hp}) d'un système de génération hybride solaire-eolien parallèle en fonction du temps

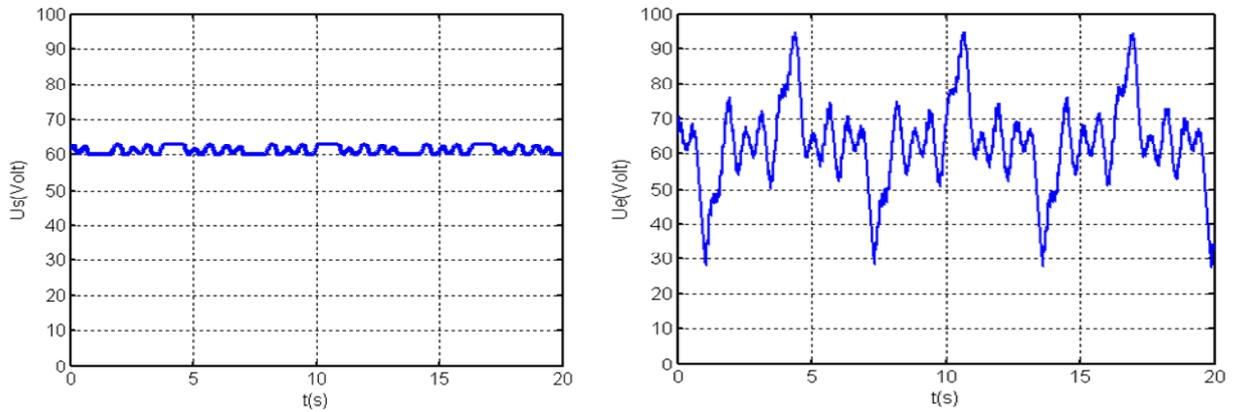


Figure (4.23) Tensions d'entrée de référence éolien (U_e) et solaire (U_s) d'un système de génération hybride solaire-eolien parallèle en fonction du temps

4.6.2 L'MPPT d'un système de génération hybride solaire-éolien série

Le système solaire-éolien série peut être architecturé comme suit :

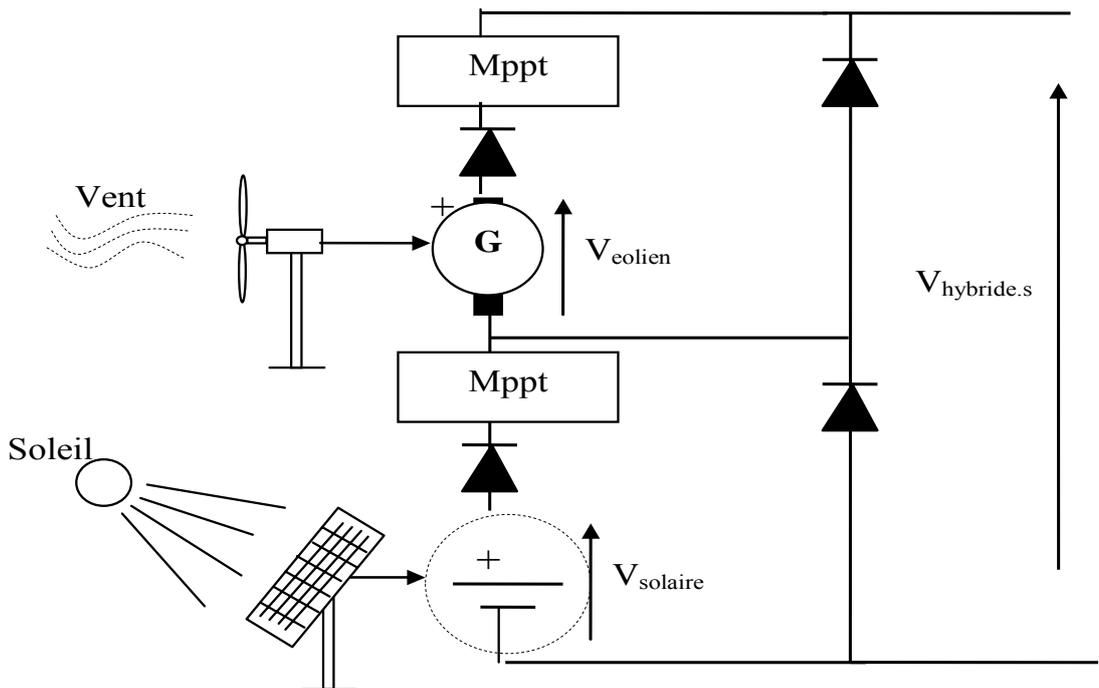


Figure (4.24) Schéma de principe d'un système de génération hybride solaire-éolien série

tel que V_{eolien} est la tension du générateur éolien, $V_{solaire}$ est la tension du générateur solaire et $V_{hybride.s}$ est la tension des deux générateurs en série au même temps.

$$V_{hybride.s} = V_{solaire} + V_{eolien} \tag{4.2}$$

Avec une tension d'excitation et alimentation induit du moteur à courant continu à excitation séparée $U_{ex} = 220V$ et $E_a = 150V$ respectivement, tension d'excitation de la génératrice $U_{exg} = 200V$; avec une tension d'alimentation pour le simulateur solaire $E = 120$ (Volt), résistance interne $r_{int} = 4\Omega$, pour une charge résistive variable, l'utilisation d'un hacheur série-parallèle et la réalisation de l'installation illustrée dans la figure (4.24) on aura les résultats expérimentaux suivants :

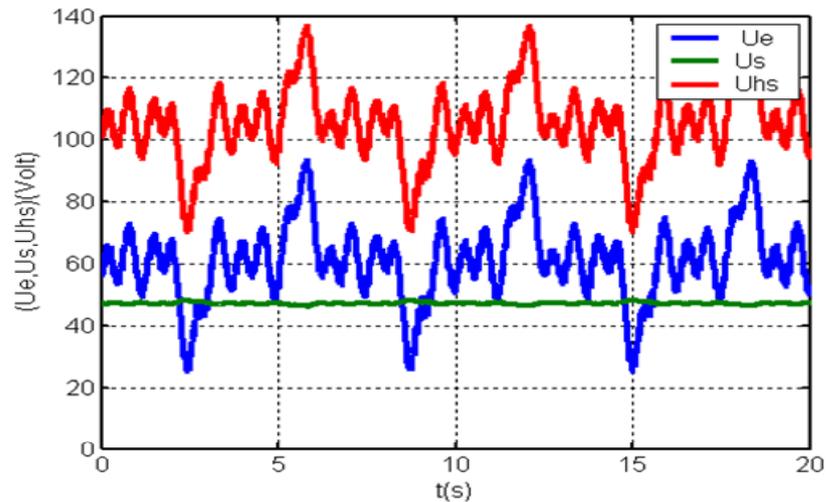


Figure (4.25) Tensions d'entrée éolien (U_e) et solaire (U_s) et hybride série (U_{hs}) d'un système de génération hybride solaire-éolien série en fonction du temps

Les deux systèmes sont de nature différentes (courbes caractéristiques différentes), ce qui oblige l'utilisation de deux MPPT indépendants l'un de l'autre.

4.7 Interprétation des résultats expérimentaux obtenus

Les différents résultats obtenus peuvent être interprétés comme suit :

- ✓ Dans la figure(4.2), on remarque que l'hacheur parallèle donne le résultat attendu (pour une tension d'entrée de 30Volt, la tension de sortie est de 60Volt et cela avec un rapport cyclique $\alpha=0.5$), malgré les pertes parasites qui demeurent le signal de sortie (conséquence d'un filtrage moins exacte) ;
- ✓ Dans la figure(4.4), l'hacheur série-parallèle donne le résultat attendu (pour une tension d'entrée de 60Volt, la tension de sortie est de 60Volt et cela avec un rapport cyclique $\alpha=0.5$), malgré les pertes parasites qui demeurent le signal de sortie (conséquence d'un filtrage moins exacte) ;

- ✓ Dans la figure(4.3), la même chose pour l'hacheur série qui donne le résultat attendu (pour une tension d'entrée de 60Volt, la tension d sortie est de 30Volt et cela avec un rapport cyclique $\alpha=0.5$), malgré les peu parasites qui demeure le signal de sortie (conséquence d'un filtrage moins exacte) ;
- ✓ L'Mppt du système solaire à tension de référence (figure (4.(5.6.7.8.9)) réalisé par un hacheur parallèle (résistance de charge variable), suit la puissance max et la tension de référence avec efficacité tant que la résistance de charge est supérieure à la résistance interne (cela explique l'instabilité de la puissance et tension entrées plus la tension de sortie après 28s car la charge exercée est inférieure);
- ✓ L'implantation de l'Mppt solaire avec un régulateur itératif (figure 4.(11.12.13.14.15)) réalisé avec un hacheur série-parallèle a prouvé son efficacité, la puissance est max malgré l'instabilité légère de la puissance max et cela à cause de l'oscillation de la puissance (principe de l'algorithme), la vitesse de fréquence limitée des composants utilisés et le calculer moins efficace de l'inductance plus la capacité de filtrage.
- ✓ La charge électrique est un ralentisseur de vitesse de la génératrice électrique car la tension est l'image de la vitesse (plus la charge inclus est grande plus le courant est grand c.à.d moins de tension (moins de vitesse)). Pour une résistance de charge variable (supérieur, égale, ou inférieur) à la résistance nominale de la génératrice (figure (4.(16.17.18.19.20)), l'Mppt du système éolien réalise son objectif et suit la vitesse de référence avec efficacité acceptable (vitesse constante ou vitesse variable) ;
- ✓ L'Mppt du système de génération hybride solaire-éolien parallèle (figure(4.(21.22.23) suit la tension de référence la plus grande de l'un ou de l'autre des deux systèmes séparément avec efficacité acceptable;
- ✓ L'Mppt du système de génération hybride solaire-éolien série (figure(4.(24.25)) fait son travail et cela par l'addition des tensions de références des deux systèmes séparément ;

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, une mise en œuvre pratique de l'MPPT par une hybridation photovoltaïque-éolien a permis de statuer sur la manière dont les deux systèmes devraient être connectés. Les résultats obtenus sur simulateurs photovoltaïque et/ou éolien avec des données copiant la réalité (vent, soleil) approuvent bien l'efficacité de telles approches.

CONCLUSION GENERALE

LE TRAVAIL ACCOMPLI

Vu le manque des bancs d'essai des systèmes solaire photovoltaïques et éoliens, donc la première tâche était la réalisation d'un émulateur éolien composé de :

- Une machine à courant continu + un hacheur série " pour simuler la turbine".
- Une génératrice à courant continu.
- Une charge résistive variable.
- Hacheurs : parallèle et série_parallèle.

La commande implantée sur le système dSPACE DS1103 a pour rôle, d'une part la commande de la turbine "moteur" par imposition du profil du vent et d'une autre part générer la commande de l'MPPT implantée.

La deuxième tâche était la réalisation d'un émulateur photovoltaïque composé de :

- Une Source de courant continu contrôler en tension et en courant " pour simuler le panneau photovoltaïque".
- Une charge résistive variable.
- Hacheurs : parallèle et série_parallèle.

La commande implantée sur le système dSPACE DS1103 a pour rôle, d'une part la commande du panneau "source" par imposition du profil de l'éclairement et d'une autre part générer la commande de l'MPPT implantée.

Enfin, une mise en œuvre pratique de l'MPPT par une hybridation photovoltaïque-éolien a permis de statuer sur la manière dont les deux systèmes devraient être connectés. Les résultats obtenus sur les simulateurs, photovoltaïque et éolien, avec des données imitant la réalité (vent, soleil) approuvent bien l'efficacité de telles approches.

PERSPECTIVES

Pour la continuité de ce travail, il nous vient à l'esprit de définir les axes de recherches qui sont, à notre avis, prometteurs pour le développement de notre travail :

1. Couplages des deux systèmes sur le réseau électrique.
2. Utilisation des générateurs à courants alternatifs.
3. Application de nouvelles commandes pour les systèmes hybrides éoliens-solaires.
4. Implantation sur sites réels.

ANNEXE I

Les différentes technologies photovoltaïques :

Il existe un grand nombre de technologie [Che.H, Ben.B, Ape.S, ade.w] mettant en oeuvre l'effet photovoltaïque. La grande majorité sont encore en phase de recherche :

- ❖ Le silicium cristallin : Il existe deux types de cellule à base de silicium cristallin :
 - les cellules de type monocristallines est un silicium a l'état brut fondu pour crée un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium, Après divers traitement (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction p-n, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs) le wafer devient cellule. BP Solar fabrique ses cellules monocristallines à partir d'une technologie innovante appelée SATURN. Le principe consiste à intégrer les grilles de collecte d'électron dans l'épaisseur de la cellule (gravure laser).
 - les cellules de type poly cristallines : le wafer est scie dans un barreau de silicium dont le refroidissement force a crée une structure poly cristalline.

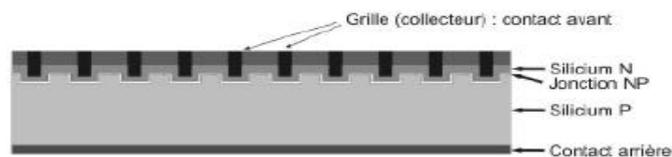
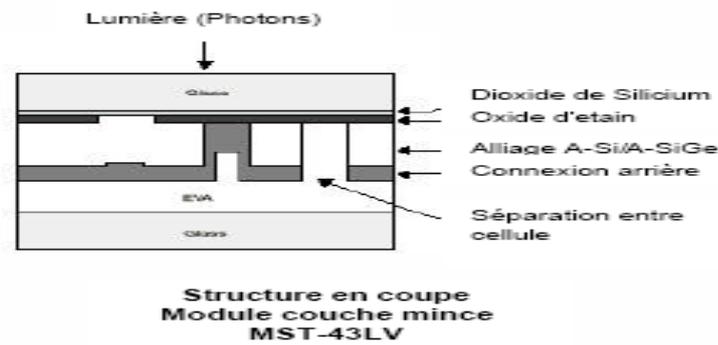


FIGURE I.1. CELLULE CRISTALLINE

- ❖ Le silicium en couche mince : La technologie couche mince désigne un type de cellule (ou module) obtenu par diffusion d'une couche mince de silicium amorphe sur un substrat (verre). Plusieurs technologies (fonction de l'alliage utilisé) sont industrialisées à ce jour.

Figure I.2. Cellule en couche mince



- ❖ La photopile à base de $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$: la majorité des connaissances fondamentales sur les composés ternaires à base de CuInSe_2 a été établie avant les années 1980 tandis que les propriétés électriques, optiques et structurales de chalcopyrites ternaires semi-conducteurs $\text{Cu}(\text{Al,Ga,In})(\text{S,Se,Te})_2$, ont été examinées dans les années 1960 et les années 1970. En 1974, Wagner a produit la première photopile à grand rendement (12,5%) avec un dispositif $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ où le CdS (type n) était évaporé sur un cristal de CuInSe_2 de type p. Par la suite, un regain d'intérêt pour ces matériaux a eu lieu lors de la réalisation d'une cellule en couches minces avec un rendement de 9,4%. En employant des alliages à base de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ et de $\text{CuIn}(\text{S,Se})_2$ des couches de bandes interdites plus larges ont été réalisées avec des tensions de circuit ouvert plus importantes. Par la suite, des couches à gradient de composition ont été réalisées permettant d'obtenir des valeurs de V_{oc} importantes tout en conservant des valeurs de J_{sc} identiques. Les valeurs des bandes interdites et les structures cristallographiques de ces composés ternaires et de leurs alliages ont aussi été examinées par calcul théoriques dans les années 1980. Ces études ont montré qu'un alliage continu semblable à ceux obtenus dans les composés III-V pouvait être obtenu. L'examen de la physique des défauts dans ces matériaux est toujours en cours.
- ❖ Les cellules photovoltaïques organiques: vers le tout Polymère : Les matériaux organiques plastiques ou polymères, faciles à mettre en œuvre, sont en passe de s'imposer à côté du silicium pour la fabrication des cellules solaires, même si des verrous technologiques restent à lever. Après absorption des photons par le polymère, des paires électron-trou liées (excitons) sont générées, puis dissociées. Compte tenu des limitations propres aux matériaux organiques (durée de vie des excitons, faible mobilité des charges), seule une faible fraction des paires électron-trou générées par les photons contribue effectivement au photo courant. L'une des idées majeures est de distribuer en volume les sites de photo génération pour améliorer la dissociation des excitons. Cette démarche est basée sur l'augmentation de la surface de la jonction, grâce à la mise en œuvre d'un réseau interpénètre de type

donneur/accepteur (D/A) assurant le transport des trous (P+) vers l'anode (ITO) et le transport des électrons (e-) vers la cathode métallique (en aluminium Al, par exemple). Si le rendement quantique de séparation des charges photo induites des systèmes associant un polymère semi-conducteur (de type PPV ou poly thiophène) à un dérivé du fullerène (PCBM) est ainsi proche de l'unité, l'enjeu est désormais de limiter les phénomènes de recombinaison et de piégeage qui limitent le transport et la collection des charges aux électrodes, afin d'augmenter l'efficacité globale des dispositifs qui demeure encore aujourd'hui faible (inférieure à 5%). L'essor de la filière est également très fortement conditionné par la maîtrise et la compréhension des mécanismes de vieillissement des cellules mais aussi par la maîtrise des technologies en couches minces pour la protection des dispositifs vis-à-vis de l'oxygène et de la vapeur d'eau atmosphériques.

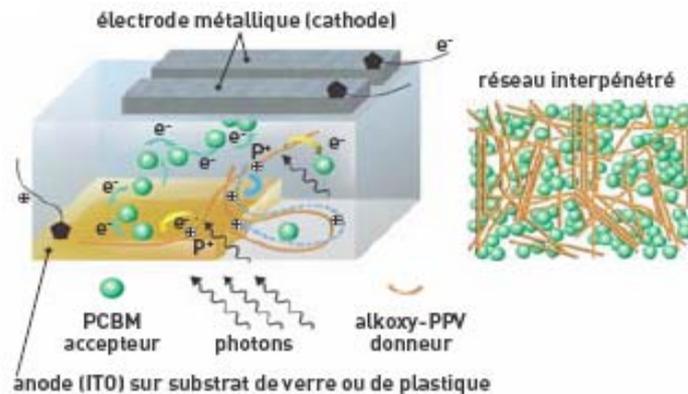


Figure I.3. Cellule organique.

- ❖ Cellules photovoltaïques silicium monocristallin en couche mince (20 à 50 μ m) : Le but est de réduire la quantité de silicium d'un facteur 10 (projet SUCCES). De plus, ce projet étudie une architecture de cellules innovante, adaptée à ces très faibles épaisseurs, permettant une automatisation plus simple et une meilleure compacité du module. SUCCES s'appuie sur deux technologies pour réaliser des couches de silicium très minces (50 μ m) : la technologie d'anodisation du silicium en silicium poreux d'une part et l'implantation ionique d'hydrogène d'autre part. Les cellules SUCCES sont réalisées par un procédé en 4 étapes :
 - Dans une tranche de silicium standard, on réalise une couche de fragilisation soit par anodisation (silicium poreux) soit par implantation ionique.
 - On fait alors croître par épitaxie (en phase vapeur ou liquide) du silicium monocristallin de bonne qualité sur cette couche de fragilisation.

- Des cellules inter digitées sont ensuite réalisées par des procédés classiques sur le silicium monocristallin.
- Enfin on reporte cette couche (d'environ 50 μ m) sur un support de faible coût (du verre par exemple). L'architecture développée est bien adaptée à ces faibles épaisseurs de silicium.

Les deux procédés de fragilisation ont été développés. Nous avons obtenu des détachements de couches en grandes surfaces sur silicium poreux et nous avons démontré la possibilité de réaliser des épitaxies de silicium monocristallin sur des couches fragilisées par implantation ionique. De plus, les premières cellules interdigitées face arrière permettant de valider la technologie ont été réalisées et sont en cours de test.

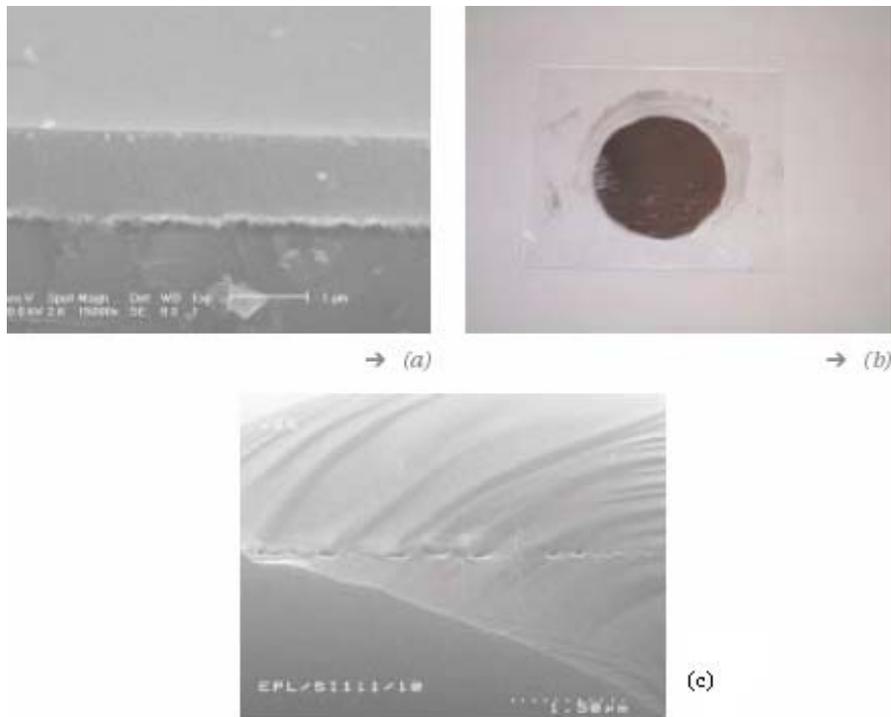


Figure I.4. Couche fragilisée par anodisation (a), détachée et collée diamètre = 2 pouces, épaisseur = 40mm(b) et fragilisée par implantation ionique (c).

Figure I.5. Première cellule solaire.



- ❖ Cellules à concentration : la concentration est un autre moyen de réduire la quantité de silicium utilisé pour réaliser des cellules solaires. La diminution de la quantité de silicium permet d'utiliser un matériau de très haute qualité et de réaliser les cellules avec les technologies de la microélectronique, et donc d'obtenir des rendements élevés. Dans le cadre du projet Européen HISICON, le CEA développe une cellule silicium pour la concentration basée sur une architecture novatrice : la cellule à contacts face avant. Les deux électrodes sont situées sur la face par laquelle la lumière pénètre. Cette architecture permet de plus fortes concentrations que les cellules à concentration classiques, dans lesquelles les contacts sont situés sur la face opposée. Afin de limiter l'effet d'ombrage dû aux métallisations, un procédé de réalisation de pistes métalliques ayant une section triangulaire a été développé (Figure I.6).

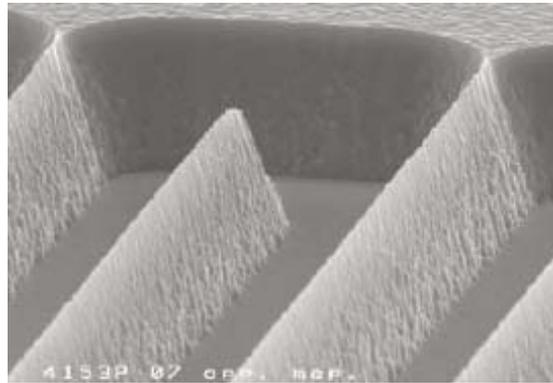


Figure I.6 Cellule à concentration (pistes métalliques à triangulaires).

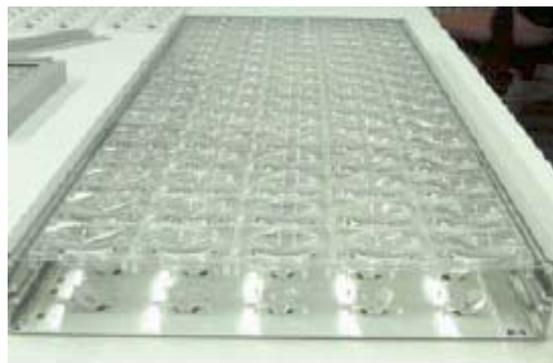


Figure I.7 Module prototype des cellules à concentration.

- ❖ Cellules interdigitées : dans le cadre de recherches prospectives, des cellules interdigitées, adaptées aux films minces ont été réalisées. Ces cellules (surface 25cm²), réalisées sur substrat épais (300µm), avec une technologie simplifiée présentent des rendements très encourageants de l'ordre de 15%.

ANNEXE II

II.1. Identification des paramètres de la machines (génératrice et moteur) à courant continu à excitation séparée [Abd.R] :

- a) Mesure de résistance : les résistances de l'induit (R_a) et de l'inducteur (R_{ex}) sont mesurées à chaud. Pour la méthode voltampère métrique, les mesures s'effectuent à différentes valeurs de l'intensité (jusqu'à 30% du courant nominal et cela pour ne pas causer l'échauffement de la machine). Alors, on aura comme résultats, pour le moteur ($R_a=5.3\Omega$ et $R_{ex}=623\Omega$) et pour la génératrice ($R_a=7.1\Omega$ et $R_{ex}=682\Omega$).
- b) Mesure en courant alternatif : l'alimentation en courant alternatif de l'induit (L_a) à inducteur (L_{ex}) ouvert et inversement donne directement les inductances de chaque enroulement.

$$L_a = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_a}{I_a}\right)^2 - R_a^2}; L_{ex} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_{ex}}{I_{ex}}\right)^2 - R_{ex}^2} \quad (II.1)$$

Alors, on aura comme résultats, pour le moteur ($L_a=0.00663$ Henry, $L_{ex} =0.00192$ Henry) et pour la génératrice ($L_a=0.00565$ Henry, $L_{ex} =0.0017$ Henry).

- c) Essai en transformateur : l'inductance mutuelle entre les circuits d'induit (L_a) et de l'inducteur (L_{ex}) peut être déterminée par l'essai en transformateur. L'induit est alimenté sous une tension alternative variable. L'inducteur est mis en court circuit, on écrit :

$$\begin{cases} U_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + M \cdot \frac{dI_{ex}}{dt} \\ 0 = R_{ex} \cdot I_a + L_{ex} \cdot \frac{dI_{ex}}{dt} + M \cdot \frac{dI_a}{dt} \end{cases} \quad (II.2)$$

L'inductance mutuelle est calculée par l'expression suivante :

$$L_a = \sqrt{-\frac{1}{2} \cdot \frac{C4}{C3} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C4^2}{C3^2} - 4 \cdot \frac{C2 - Z^2}{C3}}} \quad (II.3)$$

Avec :

$$C1 = \frac{\omega^2}{R_{ex}^2 + \omega^2 \cdot L_{ex}^2}; C2 = R_a^2 + \omega^2 \cdot L_a^2; C3 = C1^2 (R_{ex}^2 + \omega^2 \cdot L_{ex}^2); C4 = 2 \cdot C1 (R_{ex} \cdot R_a - \omega^2 \cdot L_{ex} \cdot L_a)$$

Alors, on aura comme résultats, pour le moteur (M=2.94Henry) et pour la génératrice (M=2.91Henry).

- d) Détermination du moment d'inertie (J) : Après avoir démarré le moteur (essai en moteur) avec sa tension nominale. On coupe l'alimentation de l'induit, l'inducteur reste alimenté. On note, à t=0s, les grandeurs suivantes : la tension de l'induit (U_a), le courant de l'induit (I_a), la vitesse angulaire (ω) et on enregistre également le temps que prend le moteur pour s'arrêter T(s). Alors on peut écrire :

$$J = C \cdot \frac{T}{\omega} = \frac{I_a (U_a - R_a \cdot I_a) \cdot T}{\omega^2} \quad (\text{II.4})$$

Alors, on aura comme résultats, pour le moteur (J=0.00369Kg.m²) et pour la génératrice (J=0.00312Kg.m²).

II.2. Les modèles de la machine (génératrice et moteur) à courant continu à excitation séparée sur la plateforme du logiciel Matlab :

Le modèle de la génératrice à courant continu à excitation séparée sur la plateforme SIMULINK du logiciel MATLAB peut être donner comme suit :

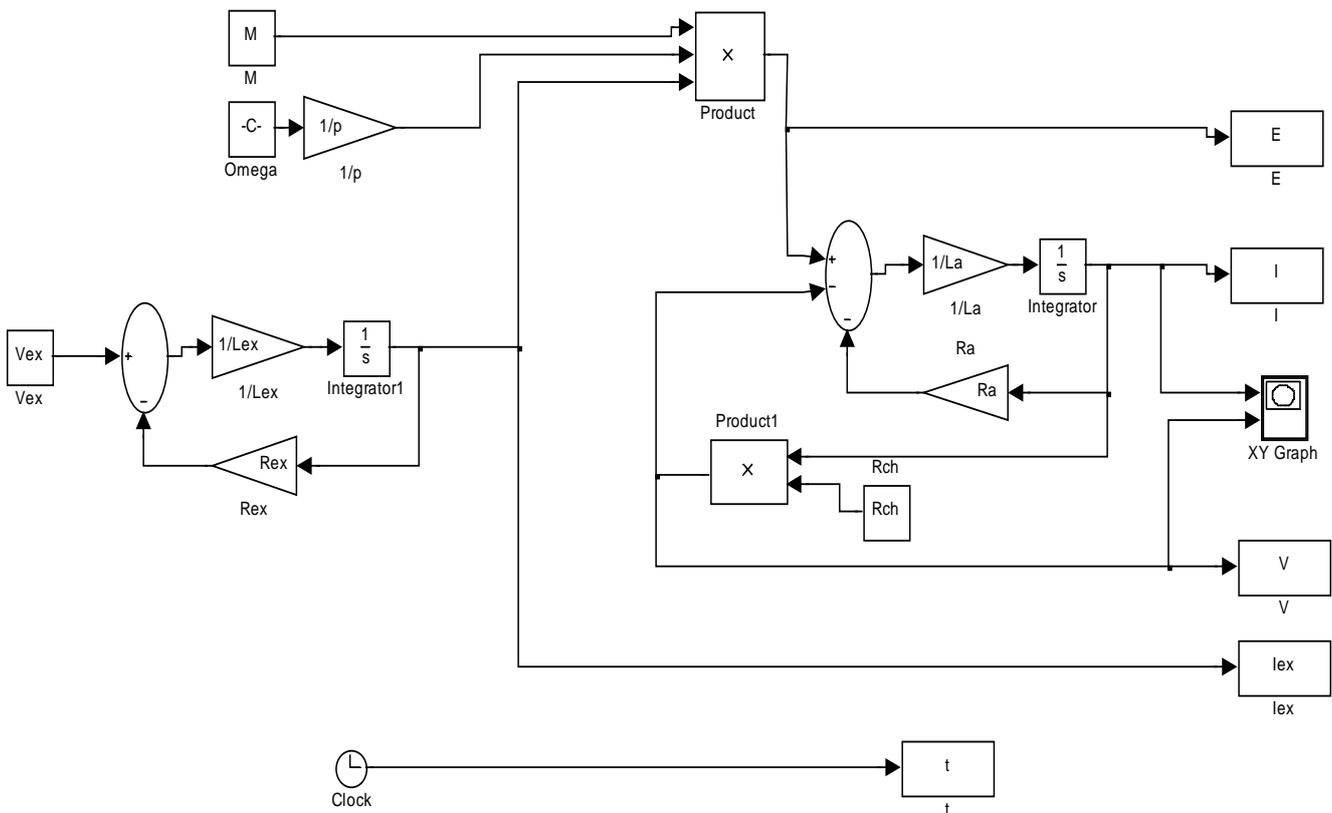


Figure II.1 le modèle de la génératrice électrique à courant continu à excitation séparée sous schémas bloc.

Le modèle du moteur à courant continu à excitation séparée sur la plateforme SIMULINK du logiciel MATLAB peut être donné comme suit :

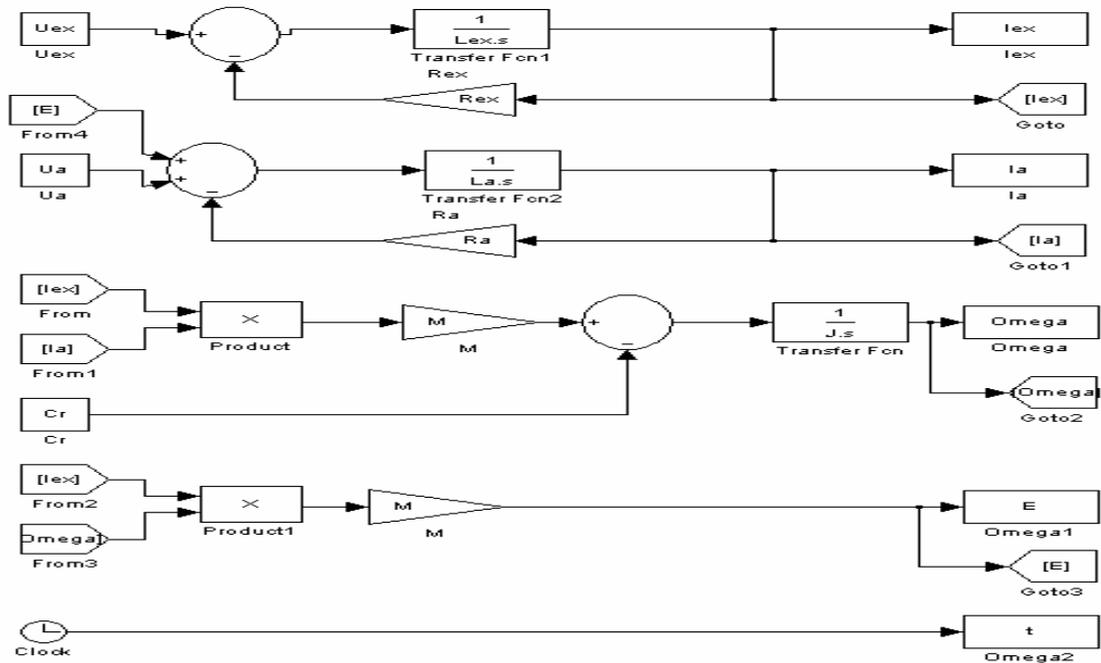


Figure II.2 Le modèle simplifié du moteur électrique à courant continu à excitation séparée sur les axes d et q.

II.3. Le modèle du vent sur la plateforme du logiciel Matlab :

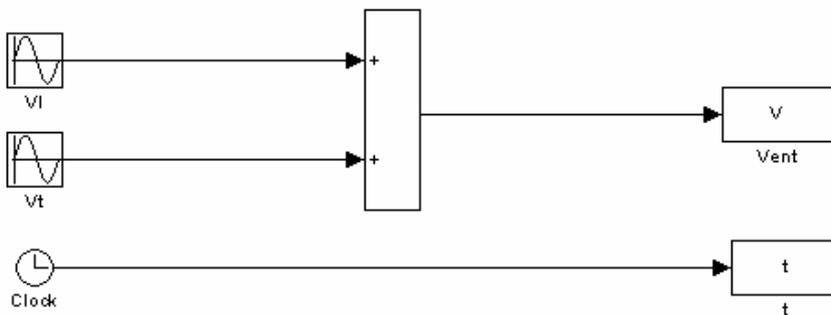


Figure II.3 Le modèle du vent sur la plateforme du logiciel Matlab.

ANNEXE III

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE LA CARTE DSPACE DS1103 :

Le DS1103 est un système électronique conçu entre autre pour développer des systèmes de commande en temps réel. Ce système est relativement rapide grâce notamment à la présence de deux processeurs de signaux préalablement cités. Le temps réel du système permet d'une part de faire l'acquisition des mesures nécessaires et d'autre part d'élaborer la commande et de piloter le convertisseur de puissance. Le DS1103 présente les caractéristiques suivantes :

✓ La conversion analogique numérique (ADC)

L'unité ADC comprend :

- 04 convertisseurs disposés en parallèle, multiplexés en 4 canaux de résolution de 16-bit chaque, avec un temps de conversion de 4 μ s. La plage du signal d'entrée de ± 10 V.
- 04 convertisseurs disposés en parallèle avec 1 canal pour chacun à 12-bit de résolution à 800 ns de temps de conversion et de plage du signal d'entrée de ± 10 V.

Le DSP esclave dispose de :

- 02 convertisseurs en parallèle, multiplexés en 4 canaux de résolution de 10-bit, le temps de conversion est de 6 μ s avec un signal d'entrée admis de ± 10 V.

✓ Les entrées/sorties numériques (Digital I/O)

- L'unité I/O du DSP maître dispose de 32-bit input/output ;
- L'unité I/O du DSP esclave dispose d'uniquement 19-bit input/output.

✓ Un support de communication CAN

✓ La conversion numérique/analogique (DAC)

- 02 DAC avec 4 canaux chacun à 14-bit de résolution et de ± 10 V de plage de la tension sortie.

- ✓ Une Interface Codeur Incrémental.
 - 01 canal analogique avec un compteur de 22/38-bit,
 - 01 canal numérique avec un compteur de 16/24/32-bit,
 - 05 canaux numériques avec un compteur de 24-bit.
- ✓ Contrôleur d'interruption.
- ✓ Interface de communication série (Serial I/O)
 - Interface UART, configurable en mode RS-232 ou RS-422.
- ✓ Compteurs internes (Timer)
 - Décompteur 32-bit avec fonction d'interruption (Timer A) ;
 - Compteur 32-bit avec pre-scaler et fonction d'interruption ;
 - Décompteur 32-bit avec fonction d'interruption (PPC built-in Decrementer) ;
 - Registre base de temps 32/64-bit (PPC built-in Time base Counter).
- ✓ Compteur comparateur entrée/sortie (Timing I/O)
- ✓ L'unité Timing I/O du DSP esclave contient
 - 4 sorties PWM accessibles pour le standard DSP PWM générateur ;
 - 3 x 2 sorties PWM accessibles pour le DSP PWM3 générateur et le DSP PWM-SV générateur ;
 - 4 canaux parallèles accessibles pour le générateur de fréquence du DSP esclave ;
 - 4 canaux parallèles accessibles pour le générateur de fréquence (F2D) et le (PWM2D) du DSP esclave.

La figure ci-dessous résume les périphériques du DS1103.

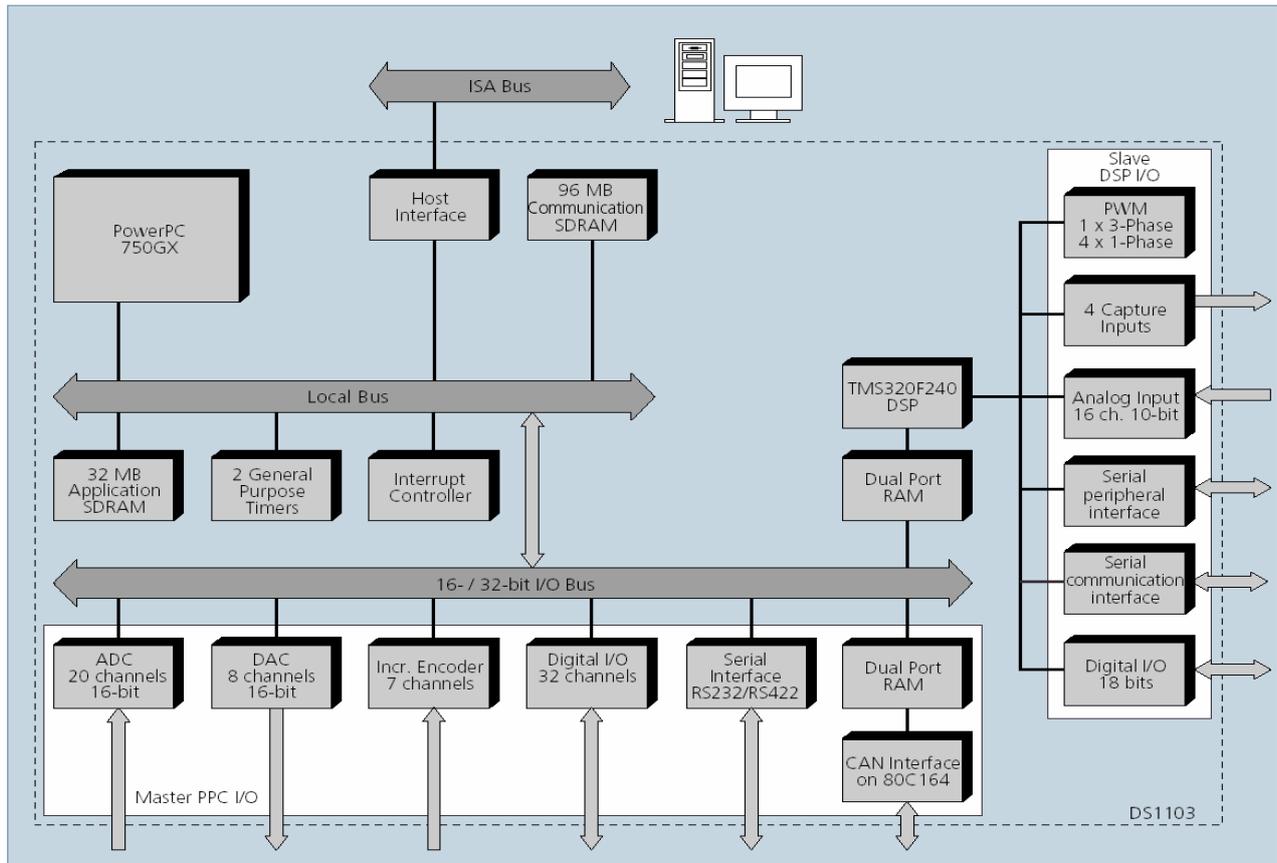


FIGURE III.1 ARCHITECTURE ET PERIPHERIQUE DU DS1103

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Fré.P] Frédéric.Poitiers, " Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseaux)", *Thèse de Doctorat de génie électrique, Université Nantes, France, 2003.*
- [Vin.R] Vincent.Rogez, "Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseaux de distribution insulaire ", *thèse de Doctorat de l'Université d'Artois, France, 2004.*
- [Sal.E] Salma.El Aimani, "modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseaux de moyenne tension" *thèse de Doctorat de l'Université Lille, France, 2004.*
- [B.Mul] B.Multon, " Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne", JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [F.Poi] Frédéric.Poitiers, " Etude d'un système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation ", JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [E.Jea] Eric Jean Roy Sambatra, " Simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents pour un site isolé", JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [S.El A] Salma.El Aimani, " Modélisation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation couplée à un réseau Moyenne Tension ", JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [Muk.R] Mukund R. Patel, Ph.D., P.E, "Wind and Solar Power Systems" , U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, 1999.
- [Ton.B] Tony.Burton, "Wind energy handbook" , Copyright 2001 by John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England.
- [A.Sap] A. Sapin, " DOUBLY-FED ASYNCHRONOUS MACHINE WITH 3-LEVEL VSI FOR VARIABLE SPEED PUMP STORAGE", Swiss Federal Institute of Technology Electromechanics and Electrical Machines Laboratory (LEME) CH-1015 Lausanne, Switzerland Tel: +41 21 693 56 09, Fax: +41 21 693 26 87, E-mail: alain.sapin@epfl.ch
- [Ben.S] Bent. Sorensen," Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects", *Roskilde University Energy & Environmen Group, Institute 2, Universitetsvej 1, P. O. Box 260 DK-4000 Roskilde, Denmark*

- [C.We] Chee.Wei Tan, "An Improved Maximum Power Point Tracking Algorithm with Current-Mode Control for Photovoltaic Applications", IEEE PEDS 2005.
- [K.Agr] K.AGROUI, "CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PERFORMANCES DES MODULES PHOTOVOLTAIQUES EN COUCHES MINCES", 8ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Centre Universitaire de Béchar–Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.
- [V.Pom] Valérie.Pommier, "Les énergies renouvelables : etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque", *Das/ENSICA-Toulouse, Tel :0561618620.*
- [L.Zar] L. Zarour,"Optimisation de la performance d'un système de pompage photovoltaïque à l'aide d'un moteur à induction", *Université Mentouri de Constantine. Algérie, Zarour.laidl@yahoo.fr.*
- [R.Gar] Romin.Garcin, "Photodiodes et photodiodes avalanche", *Université de la Méditerranée, Maitrise de physique et applications.*
- [Ang.C] M. Angel Cid Pastor, " CONCEPTION ET REALISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES ELECTRONIQUES ", *THESE présentée en vue de l'obtention de grade de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse,2006.*
- [G.Gra] G. Grand, "Direct Coupling of Power Active Filters with Photovoltaic Generation Systems with Improved MPPT Capability" , *Paper accepted for presentation at 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Bologna, Italy.*
- [Ben.B] Benoit.BROUSSE, "RÉALISATION ET CARACTÉRISATION DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUES OBTENUES PAR DÉPÔT PHYSIQUE", *Thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES,2004.*
- [Bou.O] Bouna.Ould Zeidane, "Contribution to the study of the grid connected photovoltaic system", mémoire de magistère, université de Batna,2006.
- [Jim.R] Jimmy.Royer, "LE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE", Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français,56 rue Saint-Pierre 3e étage, Québec (Québec) G1K 4A1 CANADA,Téléphone : (418) 692-5727,Télécopie : (418) 692-5644,Courriel : iepf@iepf.org, Site Internet : <http://www.iepf.org>.
- [N.Pat] N. Patcharaprakiti, "Maximum Power Point Tracking Using Adaptive Fuzzy Logic Control for Grid-Connected Photovoltaic System", *0-7803-7322-7/02/\$17.00 © 2002 IEEE.*
- [S.Chi] S. J. Chiang, "Residential Photovoltaic Energy Storage System" *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 45, NO. 3, JUNE 1998.*

- [Tom.M] Tom.Markvart, "Phovoltaics fundamentals and applications", Copyright 2003 Elsevier Ltd, Tel.: +44(0) 1865 843000,Fax: +44(0) 1865 843971.
- [D.Pon] Doming0 H. Pontoriero, "Network Compensation with Active Power Filters Integrated to PV Generation", *Paper accepted for presentation at PPT 2001 200 1 IEEE Porto Power Tech Conferenceloth -131h September, Porto, Portugal.*
- [A.Dje] A.Djerdir, "Maquette pédagogique associant un générateur photovoltaïque et des supercondensateurs dans une application transport",*Khadija.elkhadri@utbm.fr.*
- [A.Cal] A.J. Calderon, "Fractional order control strategies for power electronic buck converters", *ARTICLE IN PRESS,www.elseviercomputerscience.com,2005.*
- [L.Tey] Leong Hua Tey," Adaptive neural network control of active filters", *www.sciencedirect.com,2004.*
- [C.Mad] Chakphed.Madtharad, "Active power filter for three-phase four-wire electric systems using neural networks", *Electric Power Systems Research 60 (2002) 179–192, www.sciencedirect.com,2001.*
- [M.Zou] Ming.Zou, " Interpolation and reinitialization in time-domain simulation of power electronic circuits", *Electric Power Systems Research 76 (2006) 688–694, www.sciencedirect.com, 2006.*
- [R.Muh] Riza Muhida, " A maximum power point tracking for photovoltaic-SPE system using a maximum current controller", *Solar Energy Materials & Solar Cells 75 (2003) 697–706, www.sciencedirect.com,2003.*
- [N.Pat] Nopporn Patcharaprakiti, " Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system", *Renewable Energy 30 (2005) 1771–1788 , www.sciencedirect.com, 2005.*
- [A.Mel] A. Mellit, " An adaptive artificial neural network model for sizing stand-alone photovoltaic systems: application for isolated sites in Algeria", *Renewable Energy 30 (2005) 1501–1524, www.sciencedirect.com, 2005.*
- [V.Sal] V. Salas, " Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems", *Solar Energy Materials & Solar Cells 90 (2006) 1555–1578, www.sciencedirect.com, 2006.*
- [J.Paa] Jukka V. Paatero, " Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks ", *www.sciencedirect.com, 2006.*
- [Séb.Q] Sébastien quazola, "Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économique et application photovoltaïque bas cout", *these de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2003.*

- [Lau.B] Laure BOCQUET, " L'ENERGIE SOLAIRE EN ISRAËL", Ambassade de France en Israël – Mission Scientifique, Web: <http://www.ambafrance-il.org/sciences>,2004.
- [Syl.F] Sylvie Fay, " L'oxyde de zinc par dépôt chimique en phase vapeur comme contact électrique transparent et diffuseur de lumière pour les cellules solaires", *ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES*,2003.
- [Yan.P] Yann Pankow, "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque",thèse de doctorat, *Ecole doctorale de L'ENSAM ED 432,Lille*,2004.
- [P.Mid] Pallab Midya, " **Dynamic Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Applications**", 0-7803-3500-7/96/\$5.00 © 1996 IEEE, University of Illinois Department of Electrical and Computer Engineering Urbana, Illinois 61 801,1996.
- [T.Wu] TSAI-FU WU, " 1Ø3W Grid-Connection PV Power Inverter with Partial Active Power Filter", *IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS* VOL. 39, NO. 2 *APRIL* 2003.
- [T.Wu] TSAI-FU WU, " A 1 Ø 3W Inverter With Grid Connection and Active Power Filtering Based on Nonlinear Programming and Fast-Zero-Phase Detection Algorithm ", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 20, NO. 1, *JANUARY* 2005.
- [T.Wu] TSAI-FU WU, " Single-Phase Inverter System for PV Power Injection and Active Power Filtering With Nonlinear Inductor Consideration ", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 41, NO. 4, *JULY/AUGUST* 2005.
- [P.Tan] P. C. Tan, " **A New Single-phase Two-Wire Hybrid Active Power Filter Using Extension $p-q$ Theorem for Photovoltaic Application** ", National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [Che.H] Chenoufi Hakim, " Optimisation du procede technologique de realisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion ", *Mémoire de magistère,université de Batna*,2005.
- [Jam.K] JAMIL KÜNDIG, " CELLULES SOLAIRES EN COUCHES MINCES DE SILICIUM: RESISTANCE AUX RADIATIONS ET APPLICATIONS SPATIALES", *ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES*,2003.
- [Van.T] Vanessa Terrazzoni-Doudrix, " Cellules solaires en couches minces de silicim amorphe: effets de substrat réflecteur texturé et de la couche intrinsèque sur le courant photo-généré", Thèse de doctorat, université de Neuchatel, 2004.
- [M.Iva] MENY IVAN, " Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance ", Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM) meny@univ-montp2.fr.

- [A.Iul] Antoneta Iuliana BRATCU, " MODÉLISATION À ÉVÉNEMENTS DISCRETS D'UN SYSTÈME ÉOLIEN À VITESSE VARIABLE EN VUE DE LA COMMANDE SUPERVISÉE", *6e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation - MOSIM'06 - du 3 au 5 avril 2006 – Rabat- Maroc « Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Défis et Opportunités ».*
- [L.Cha] Liuchen Chang, " Systèmes de conversion de l'énergie éolienne ", IEEE Canadian Review - Summer / Été 2002.
- [S.Che] Srinivas R.Chellapilla, " A dynamic model of induction generators for wind power studies", 0-7803-7989-6/03/\$17.00 © 2003 IEEE.
- [F.Cos] François COSTA, " TRANSMISSION D'ÉNERGIE A DISTANCE", *Energie portable : autonomie et intégration dans l'environnement humain. 21-22 mars 2002 - Cachan – Journées Electrotechniques du Club EEAISBN 2-909968-10-3.*
- [Ada.M] Andreas Petersson, " Evaluation of Current Control Methods for Wind Turbines Using Doubly-Fed Induction Machines", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 20, NO. 1, JANUARY 2005.
- [R.Cul] Richard A. Cullen, " *What is Maximum Power Point Tracking (MPPT) and How Does it Work?*", 2598 Fortune Way, Suite K · Vista, CA 92081 · Phone 760-597-1642 · Fax 760-597-1731 · www.blueskyenergyinc.com.
- [H.Wag] Hans-Günther Wagemann, " Séminaire `a batna 2006" , .
- [Abd.R] Abdessemed Rachid, " Modélisation des machines électriques", Batna university press, 1997.
- [Sai.J] Saint Jean, " Electrotechnique et machines électriques ", Editions Eyrolles 61, boulevard Saint-Germain, Paris, 1977.1976 .
- [Che.H] Chenoufi hakim, " Optimisation du procede technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion " Thèse de magistère 'Université de batna', 2005.
- [Ben.B] Benoit BROUSSE & Jean-Claude Steffens " Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique.", Thèse de Doctorat, Université de LIMOGES, 2004.
- [Ape.S] Apex BP Solar " Informations techniques sur le photovoltaïque", Web <http://www.apex-bpsolar.com>, Décembre 2000.
- [ade.w] ademe www.ademe.fr/particuliers/Fiches/3654/default.htm " Solaire : le bon reflexe ", UV-leval.