

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Département : Génie Electrique

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

## THÈME

Modélisation d'une chaine de conversion hybride

*Préparé par :*

ALLAHOUM Aghiles

LAZREG Abderahmane

**Devant le Jury :**

Nom et Prénom	Grade	Qualité
M.LARBI	Pr	Président
Y. MIHOUB	MCA	Examineur
Y. MESSLEM	Pr	Examineur
ZINE RACHED Souhilla	MCB	Encadreur

Promotion 2021/2022

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*Pour mes parents qui m'ont soutenu jusqu'à ce jour.*

*Pour toute ma famille en précisant ma mère*

*Mon grand-père Moussa*

*et ma sœur salma*

*sans oublier mon petit prince*

*Redouene et la princesse assinate*

*Pour toute personne que j'ai connue lors de mon bref*

*passage à l'université.*

*Pour mon encadreur Zine rached souhila*

*Tous mes amis.*

*Allahoum Aghiles*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*A mon père, que ALLAH lui fasse miséricorde.*

*A ma mère, que Allah la protège ;*

*A mes chers frères et soeurs ;*

*A toute ma grande famille ;*

*A mon encadreur Zine rached souhila*

*A tous mes amis, et toute la promotion Automatique et  
informatique industrielle 2021/2022.*

*Lazreg Abderahmane*

# *Remerciement*

*Tout d'abord, nous remercions ALLAH, le tout puissant, qui nous a donné la santé, le courage et la patience de finir ce travail.*

*Nous remercions sincèrement notre encadreur Zine Rached Souhilla.*

*Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce modeste travail*

*Merci à tous les professeurs de Ibn-Khaldoun pour les efforts qu'ils ont consenti à notre instruction durant toutes les années que nous avons passé dans cette université*

*Nous remercions tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce mémoire ; que ceux qui m'ont aidé, d'un simple encouragement à un appui continu, trouvent ici les expressions de ma reconnaissance la plus sincère.*

## ملخص :

وفي هذا العمل الإفرادي، يقدم إسهام في دراسة نظام مختلط للطاقة المتجددة والإشراف عليه، من أجل حل مشكلة لقد طورنا ودرسنا بشكل منفصل نموذجين لمولدات طاقة الرياح والطاقة الشمسية المتجدد . تقصير مصادر الطاقة المتجددة لاستخرا MPPT الذي تم التحكم في تشغيله بواسطة الأمر GSAP بدأ هذا العمل بتصميم مولد رياح مبني على نموذج . ثم عن طريق تصميم مولد للطاقة الشمسية تم تعديل . ج أقصى طاقة هوائية متاحة من خلال تغيير سرعة التوربين ودورانه أما المرحلة الأخيرة . (منطق ضبابي) تشغيله بواسطة التحكم في معامل نقل الطاقة بالإضافة إلى إستراتيجية تحكم جديدة فتمثل في الربط بين نظامي الرياح والفولطية الضوئية.

الكلمات المفتاحية: نظام الطاقة الهجين، مولد الرياح، مولد الطاقة الشمسية ، م ب ب ت .

## Résumé :

Dans le présent travail de mémoire, une contribution à l'étude et à la supervision d'un système d'énergie renouvelables hybride, afin de résoudre le problème de l'intermittence des sources renouvelables, est présenté. Nous avons développé et étudié séparément deux modèles de générateurs d'énergie renouvelable éolienne et solaire. Ce travail a débuté par la conception d'un générateur d'énergie éolienne basée sur le model GSAP, dont le fonctionnement été sous contrôle par la commande MPPT afin d'extraire le maximum de puissance aérodynamique disponible en variant par commande la vitesse et le couple de la turbine. Puis par la conception d'un générateur d'énergie solaire dont le fonctionnement ajusté par la commande MPPT avec l'ajout d'une nouvelle stratégie de commande (Logique Floue). La phase finale Présente le raccordement des deux systèmes éoliens et photovoltaïque.

Mots clés : Système d'énergie hybride, générateur éolienne, générateur photovoltaïque, MPPT.

## Abstract :

In this thesis work, a contribution to the study and supervision of a hybrid renewable energy system, in order to solve the problem of intermittency of renewable sources, is presented. We have developed and studied separately two models of wind and solar renewable energy generators. This work started with the design of a wind generator based on the PMSG model, whose operation was controlled by the MPPT command in order to extract the maximum available aerodynamic power by varying the speed and torque of the turbine. Then by the design of a solar energy generator whose operation was adjusted by the MPPT control with the addition of a new control strategy (Fuzzy Logic). The final phase presents the connection of the two wind and photovoltaic systems.

Keywords : hybrid energy system, wind generator, solar generator, MPPT

## Liste des figures

### Chapitre I : Système éolienne.

<b>Fig.I. 1: Composant d'une éolienne.....</b>	<b>3</b>
<b>Fig.I. 2: Boite d'engrenage.....</b>	<b>5</b>
<b>Fig.I. 3: Eléments du système mécanique complet. ....</b>	<b>6</b>
<b>Fig.I. 4: Modèle de l'éolienne.....</b>	<b>6</b>
<b>Fig.I. 5: Bilan des forces sur une pale. ....</b>	<b>7</b>
<b>Fig.I. 6: Représentation du système mécanique de l'éolienne. ....</b>	<b>7</b>
<b>Fig.I. 7: Modèle mécanique de la turbine.....</b>	<b>8</b>
<b>Fig.I. 8: Canal de courant d'air autour d'une éolienne.....</b>	<b>9</b>
<b>Fig.I. 9: Schéma du Coefficient aérodynamique (<math>C_p</math>) en fonction du ratio de vitesse de la turbine (<math>\lambda</math>).....</b>	<b>11</b>
<b>Fig.I. 10: Représentation de la vitesse spécifique.....</b>	<b>11</b>
<b>Fig.I. 11: Schéma bloc de la turbine.....</b>	<b>13</b>
<b>Fig.I. 12: Allure de la vitesse du vent.....</b>	<b>14</b>
<b>Fig.I. 13: Allure du coefficient de puissance en boucle ouverte.....</b>	<b>14</b>
<b>Fig.I. 14: Allure de la vitesse spécifique en boucle ouverte.....</b>	<b>14</b>
<b>Fig.I. 15: Allure de la vitesse de rotation en boucle ouverte.....</b>	<b>15</b>
<b>Fig.I. 16: Caractéristique puissance – vitesse d'une éolienne.....</b>	<b>16</b>
<b>Fig.I. 17: Principe de fonctionnement de la MPPT. ....</b>	<b>17</b>
<b>Fig.I. 18: Schéma bloc de la commande directe de vitesse de la turbine avec un régulateur PI.....</b>	<b>18</b>
<b>Fig.I. 19: Schéma bloc de la commande directe de vitesse de la turbine avec un régulateur PI. ....</b>	<b>19</b>
<b>Fig.I. 20: Représentation du Point de fonctionnement optimal de la turbine.....</b>	<b>20</b>
<b>Fig.I. 21: Allure de la vitesse du vent.....</b>	<b>21</b>
<b>Fig.I. 22: Allure du coefficient de puissance avec un régulateur PI.....</b>	<b>21</b>
<b>Fig.I. 23: Allure de la vitesse spécifique avec un régulateur PI.....</b>	<b>21</b>
<b>Fig.I. 24: Allure de la vitesse de rotation avec un régulateur PI.....</b>	<b>22</b>

## Chapitre II : Système Photovoltaïque

<b>Fig.II. 1: Principe de la conversion photovoltaïque.....</b>	<b>23</b>
<b>Fig.II. 2: Cellule photovoltaïque (monocristalline).....</b>	<b>24</b>
<b>Fig.II. 3: Cellule PV poly-cristalline.....</b>	<b>25</b>
<b>Fig.II. 4:schéma équivalent d'une cellule PV .....</b>	<b>26</b>
<b>Fig.II. 5: Cellule, module et panneau photovoltaïques.....</b>	<b>28</b>
<b>Fig.II. 6: Système autonome. ....</b>	<b>29</b>
<b>Fig.II. 7: Système hybride.....</b>	<b>30</b>
<b>Fig.II. 8: Systèmes raccordés au réseau.....</b>	<b>30</b>
<b>Fig.II. 9: Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série. [24] ...</b>	<b>31</b>
<b>Fig.II. 10: Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle ....</b>	<b>32</b>
<b>Fig.II. 11: Circuit équivalent d'une cellule PV –Modèle réel – .....</b>	<b>34</b>
<b>Fig.II. 12: Modèle du circuit équivalent d'un champ PV sous Simulink.....</b>	<b>38</b>
<b>Fig.II. 13: Schéma bloc de calcul du courant maximal .....</b>	<b>38</b>
<b>Fig.II. 14: Schéma du calcul de <math>I_0</math> sous Simulink .....</b>	<b>38</b>
<b>Fig.II. 15: Schéma bloc de calcul du courant photovoltaïque.....</b>	<b>39</b>
<b>Fig.II. 16: Schéma du système complet sous Simulink.....</b>	<b>39</b>
<b>Fig.II. 17: Caractéristique <math>I=f(V)</math> du module photovoltaïque .....</b>	<b>40</b>
<b>Fig.II. 18: Caractéristique <math>P=f(V)</math> du module photovoltaïque .....</b>	<b>41</b>
<b>Fig.II. 19: Caractéristique <math>I(V)</math> pour différentes valeurs de T .....</b>	<b>41</b>
<b>Fig.II. 20: Caractéristique <math>P(V)</math> pour différentes valeurs de T .....</b>	<b>42</b>
<b>Fig.II. 21: Caractéristique <math>I(V)</math> pour différentes valeurs de G.....</b>	<b>43</b>
<b>Fig.II. 22: Caractéristique <math>P(V)</math> pour différentes valeurs de G.....</b>	<b>43</b>
<b>Fig.II. 23: Schéma d'un système photovoltaïque .....</b>	<b>44</b>
<b>Fig.II. 24: Schéma de principe d'un convertisseur Boost .....</b>	<b>45</b>
<b>Fig.II. 25: Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur .....</b>	<b>46</b>
<b>Fig.II. 26: Schémas équivalents de l'hacheur survolteur (A) : K fermé,(B) : ouvert pour la première période d.TS: .....</b>	<b>46</b>
<b>Fig.II. 27: Schéma de simulation d'un hacheur boost .....</b>	<b>47</b>
<b>Fig.II. 28: le principe l'algorithme P&amp;O. ....</b>	<b>48</b>
<b>Fig.II. 29: Organigramme de la méthode P&amp;O. ....</b>	<b>49</b>

<b>Fig.II. 30: schéma block de la technique PO .....</b>	<b>50</b>
<b>Fig.II. 31: Structure de base d'un contrôleur floue .....</b>	<b>50</b>
<b>Fig.II. 32: l'interface d'accueil du fichier FIS.....</b>	<b>51</b>
<b>Fig.II. 33: Les variables linguistiques de sortie.....</b>	<b>52</b>
<b>Fig.II. 34. Les variables linguistiques d'entrée .....</b>	<b>52</b>
<b>Fig.II. 35: Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue .....</b>	<b>53</b>
<b>Fig.II. 36: Résultats de la méthode de P&amp;O .....</b>	<b>53</b>
<b>Fig.II. 37: Résultats la méthode de la logique floue.....</b>	<b>53</b>
<b>Chapitre III : Système hybride</b>	
<b>Fig.III. 1: Représentation du repère abc. ....</b>	<b>58</b>
<b>Fig.III. 2: Structure du circuit des enroulements d'une MSAP.....</b>	<b>58</b>
<b>Fig.III. 3: Représentation de la MSAP dans le repère de Park.....</b>	<b>60</b>
<b>Fig.III. 4: Modèle de la MSAP.....</b>	<b>61</b>
<b>Fig.III. 5: Configuration d'un système hybride à bus DC.....</b>	<b>63</b>
<b>Fig.III. 6: Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.....</b>	<b>63</b>
<b>Fig.III. 7: Schéma bloc du système hybride relié avec charge.....</b>	<b>64</b>
<b>Fig.III. 8 : Résultat de la puissance de pv et éolien.....</b>	<b>65</b>
<b>Fig.III. 9: Résultat de MPPT et le voltage du PV .....</b>	<b>64</b>
<b>Fig.III. 10 : Tension de bus à courant continu.....</b>	<b>65</b>
<b>Fig.III. 11: Résultat de la tension de la charge.....</b>	<b>64</b>
<b>Fig.III. 12: Résultat de la puissance de la charge .....</b>	<b>64</b>



## Liste des tableaux

### \_\_\_\_\_CHAPITRE I\_\_\_\_\_

<b>Table 1: Fonctionnement de la MPPT.....</b>	<b>17</b>
--	-----------

### \_\_\_\_\_CHAPITRE II\_\_\_\_\_

<b>Table II 1: Comparatif des différentes technologies :</b>	<b>26</b>
<b>Table II 2: Caractéristiques électriques du module photovoltaïque du panneau KC200GT dans les conditions standards « CST » [4] : .....</b>	<b>39</b>
<b>Table II 3: les règles floues :.....</b>	<b>52</b>
<b>Table II 4: la valeurs moyenne de la tension et la puissance de générateur photovoltaïque et la sortie du système photovoltaïque :.....</b>	<b>54</b>

## Liste des Acronymes et des Symboles

EnR :	Energies Renouvelables
PV :	Photovoltaïque
GPV :	générateur photovoltaïque
MPPT :	Maximum Power Point Tracking
DC :	Direct current (courant continu)
AC :	Alternating current (courant alternatif)
J.-C :	Le calendrier julien proleptique
SH :	Système hybride
SHSER :	Système hybride a sources d'énergie renouvelables
FF :	Facteur de forme
PPM :	Point de Puissance Maximale
SEH :	Système d'énergie hybride
MLI :	Modulation de Largeur d'Impulsion
PWM :	Pulse Width Modulation
CAN :	Convertisseur Analogique-Numérique
D :	Rapport Cyclique
P&O :	Perturbe and Observe

$E_{ph}$ :	Energie du photon
$\lambda_0$ :	Longueur d'onde (m)
$h$ :	Constante de Planck
$C$ :	Vitesse de la lumière (m/s).
$\theta$ :	L'angle de pénétration du rayonnement solaire
$\phi$ :	Latitude du lieu
$\lambda$ :	Longitude du lieu
$\delta$ :	Déclinaison du soleil
$H$ :	Angle horaire du soleil
$E_t$ :	Correction de l'équation du temps ;
$D_{js}$ :	Durée d'ensoleillement
$HL$ :	Le lever du soleil
$HC$ :	Le coucher du soleil
$E_g$ :	Energie de gap
$E_c$ :	Energie de conduction
$E_v$ :	Energie de valence
$V_{oc}$ :	Tension de circuit ouvert
$I_{cc}$ :	Courant de court-circuit
$n_s$ :	Nombre des cellules en série
$n_p$ :	Nombre des cellules en parallèle
$V_{opt}$ :	Tension optimale du panneau
$I_{opt}$ :	Courant optimal du panneau
$PPV$ :	Puissance disponible en sortie du générateur PV
$P_{max}$ :	Puissance maximale du générateur PV

$dr$ :	Largeur de section de pale
$dF$	: Force résultante appliquée sur un élément de pale
$l(r)$ :	longueur de la corde à la distance $r$ de l'axe de rotation
$dL$	: La portance, normale à la direction du vent apparent
$dD$	: La force, parallèle à la direction du vent
$a\ dF$	: La pousse axiale, perpendiculaire au plan de rotation
$t\ dF$ :	: La pousse tangentielle, dans la direction de rotation
$dD, dL$ :	: Les modules des forces
$CL$ :	: Coefficient de portance (sans dimension)
$CD$ :	: Coefficient de traînée (sans dimension)
$L$ :	La force de portance
$D$ :	La force de traînée
$F_a$ :	La poussée axiale
$F_t$ :	La poussée de rotation
$dA$ :	surface du tronçon de pale
$C_z$ :	Coefficient de portance suivant le plan de rotation
$C_x$ :	Coefficient de poussée
$\omega$ :	Module du vent apparent
$\alpha$ :	L'angle d'incidence
$EC$ :	L'énergie cinétique d'une masse d'air
$m$ :	masse d'air
$V$ :	Vitesse de déplacement de la masse d'air

## Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des Acronymes et des Symboles

Sommaire

Introduction générale.....1

Chapitre I : Système Eolien

I.1 Introduction .....3

I.2 Les principaux composants d'une éolienne.....3

I.3 Stratégie de fonctionnement d'une éolienne .....5

I.4 Modélisation d'une éolienne.....5

I.4.1 Modélisation du vent.....6

I.4.2 Bilan des forces sur une pale .....7

I.4.3 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine : .....7

I.4.4 Loi de Betz.....9

I.4.5 Calcul de coefficient de puissance.....10

I.4.6 Calcul de la vitesse spécifique ou normalisée (Tip-Speed-Ratio).....11

I.4.7 Modèle du multiplicateur .....12

I.4.8 Equation dynamique de l'arbre .....12

I.4.9 Résultats de simulation en boucle ouverte .....13

I.5 Stratégies de commande de la turbine éolienne : .....15

I.5.1 Maximisation de la puissance extraite dans la zone 2.....16

I.5.2 Commande en vitesse de la turbine : .....18

I.5.2.1. Conception de correcteur de vitesse par PI classique :.....	18
I.5.2.2. Résultats de simulation :.....	20
<b>Chapitre II : Système Photovoltaïque</b>	
II.1. Energie solaire photovoltaïque :.....	23
II.1.1. Définition :.....	23
II.1.2. L'effet photovoltaïque et le principe de conversion : .....	23
II.1.3. Différents types des cellules photovoltaïques :.....	24
II.1.3.1 Cellules monocristallines :.....	24
II.1.3.2. Cellules polycristallines :.....	25
II.1.3.3. Cellules amorphes :.....	25
II.1.4. Les caractéristiques de cellules PV : .....	26
II.1.4.1. Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :.....	27
II.1.4.2. La tension du court ouvert ( $V_{co}$ ) :.....	27
II.1.4.3. Facteur de forme ( $FF$ ) :.....	27
II.1.4.4. Rendement :.....	28
II.1.5. Modules (ou Panneaux) PV : .....	28
II.1.6. Applications des systèmes PV :.....	29
II.1.6.1. Systèmes autonomes :.....	29
II.1.6.2. Systèmes hybrides :.....	29
II.1.6.3. Systèmes couplés au réseau :.....	30
II.1.7. Générateur photovoltaïque (GPV) :.....	30
II.1.8. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque : .....	33
II.1.8.1. Avantages :.....	33
II.1.8.2. Inconvénients :.....	33
II.2. Représentation électrique et mathématique de la cellule PV : .....	33
II.2.1 Création du modèle de la cellule sous Matlab/Simulink :.....	34
II.2.2. Détermination mathématique des paramètres inconnus : .....	34

II.2.3. Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque : .....	37
II.3. RESULTATS ET L'ANALYSE DE LA SIMUMLATION : .....	40
II-3-1 Les caractéristiques non linéaires I-V et P-V de la cellule solaire sous les conditions standards : .....	40
II.3.2. L'Influence de la variation des conditions météorologiques sur les caractéristiques de PV : .....	41
II.4. Commande de système photovoltaïque : .....	44
II.4.1. Modélisation du système photovoltaïque : .....	44
II.4.1.1. Modélisation du convertisseur statique DC/DC : .....	45
II.4.1.2. La commande MPPT : .....	47
II.5. CONCLUSION : .....	55
<b>Chapitre III : Système Hybride</b>	
III.1. Introduction : .....	56
III.2. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents : .....	56
III.2.1. Introduction : .....	56
III.2.2. Description de la machine : .....	56
III.2.3. Modèle de la machine synchrone à aimants permanents : .....	57
III.2.4. Équations de la machine synchrone dans le repère abc : .....	58
III.2.5. Modèle de la machine synchrone dans le repère de PARK : .....	59
III.2.6. Equation du couple électromagnétique : .....	61
III.2.7. Equation mécanique : .....	61
III.3. Architecture à bus DC : .....	62
III .4. Convertisseurs : .....	63
III.4.1. Les convertisseurs DC-AC (onduleurs) : .....	63
III.4.1.1. Structure d'ondeur : .....	63
Conclusion générale .....	65

Annexe

# **Introduction Générale**



Utilisés pendant longtemps comme source d'énergie, les fossiles présentent des impacts négatifs sur l'environnement d'autant que leurs réserves s'épuisent rapidement, ce qui a poussé les pays industrialisés à opter progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables (soleil, vent ...), qui sont devenu des concurrents potentiels pour la production d'énergie [40],[41].

Depuis le premier choc pétrolier de 1973 et à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus, et plus précisément dans certaines zones géographiques notamment dans les pays de l'Asie, la consommation mondiale d'énergie s'est vue connaître une augmentation énorme ces dernières années, [42].

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé les risques de pénurie les matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, les gouvernements engagés doivent donc multiplier leurs actions dans le secteur de la production d'énergie électrique afin de développer des sources d'Energies Renouvelables, propres et inépuisables, ces dernières représentent un gisement considérable au niveau mondial [42]. Pour cela plusieurs travaux de recherches ont été lancés dans plusieurs laboratoires de recherche dans le domaine de développement durable, pour but de satisfaire la demande de consommation énergétique d'une part et d'autre part pour réduire les effets négatives des ressources d'origine fossile sur l'environnement [43]. Parmi les principales ressources d'énergie renouvelable, on distingue l'énergie solaire (l'énergie que transporte le rayonnement solaire), l'énergie éolienne, l'énergie hydro-éolienne (ces éoliennes sous-marines utilisent les courants marins pour produire de l'électricité), l'énergie de la biomasse, l'énergie géothermique et l'énergie hydraulique.

La source d'énergie solaire et l'éolienne sont les deux sources renouvelables distribuées d'une manière plus au moins équitable sur notre planète terre, qui sont disponible partout sur le globe terrestre. Qui sont de mieux en mieux exploitées.

En ce qui concerne notre pays : l'Algérie, l'enjeu du développement des énergies renouvelables est encore plus important. En effet, ces énergies permettront de plus en plus de couvrir la croissance nécessaire et légitime des services énergétiques de base dans les domaines du développement rural, de l'habitat, de la santé, de l'éducation puis à long terme, de l'industrie. Ainsi de sa part sa situation géographique, l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation des énergies solaire et éolienne. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement solaire reçu (169.440 TWh/an), le plus important de tout le bassin méditerranéen . Tandis que l'énergie éolienne qui représente un potentiel important à la région sud Adrar très précisément, donne une autre extension pour notre pays pour se diversifier au point de production d'électricité d'origine renouvelables dans les décennies à venir.

Cependant, la production d'électricité à partir seulement d'une des deux sources d'énergie citées ci-dessus, est un objectif très souvent limité par le prix de revient final du KWh électrique produit, en raison de l'irrégularité du vent et de la discontinuité dans le temps du rayonnement solaire qui posent le problème du stockage d'énergie. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles. La production d'électricité au moyen d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est un grand intérêt pour les pays en développement, comme l'Algérie. Elle possède des nombreuses régions, isolées et éloignées de réseaux classiques de distribution d'électricité. Ainsi l'extension de ces réseaux serait d'un cout financier exorbitant. Pour résoudre ce problème.

L'énergie éolienne est devenue la plus compétitive, par le fait de nombreux avantages tel que l'impact positif sur l'environnement, le développement économique, la propagation rapide, l'innovation technologique et l'abondance des nouvelles méthodologies de contrôle des turbines à vitesses variables, en plus de ça elle est gratuite. Néanmoins, plusieurs problèmes ont été rencontrés, liés d'une part à la complexité des systèmes de conversion éolienne ; à savoir, la nécessité du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice, et d'une autre part l'instabilité de la vitesse du vent [45], [46].

### *Structure de la mémoire*

Dans le premier chapitre, quelques notions principales sur la technologie éolienne sont données telles que, la conception des turbines, leur fonctionnement, ainsi que l'architecture de chaînes de conversion d'énergie en association avec les différents types de génératrices. Puis on se consacre à l'étude et à la modélisation de la turbine, ainsi que l'application de la MPPT munie d'un PI.

La modélisation d'un panneau photovoltaïque est réalisée dans le deuxième chapitre, une commande est appliquée pour extraire le maximum de puissance, après un modèle simulink est établi dans le but de vérifier le fonctionnement.

On introduit une nouvelle stratégie de commande avancée (Logique Floue). Les résultats de simulation sont analysés et comparés dans un but de montrer l'efficacité de la commande appliquée et les améliorations apportées.

Dans le troisième chapitre. La modélisation du bus continu, et la liaison des deux sources renouvelables à une charge est établie. Les résultats de simulation de la chaîne complète sont présentés pour mettre en évidence la validité de la stratégie choisie face aux fluctuations du vent et de l'éclairement.

# **Chapitre I**

## **Systeme Eolien**

## I.1 Introduction

Un aérogénérateur, plus communément appelé « éolienne » permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Son fonctionnement est simple et s'inspire de la technologie des moulins à vent. Dans cette partie, On s'intéresse principalement à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne et de la génératrice synchrone à aimants permanents. Une étude des modèles de la turbine et de la génératrice synchrone à aimants permanents est présentée, en vue de connaître leurs principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance, le couple, la limite de BETZ pour la turbine et les équations électriques et mécaniques pour la génératrice.

## I.2 Les principaux composants d'une éolienne.

Les principaux éléments constituant une éolienne à axe horizontal sont présentés sur l'image ci-dessous.



Fig.I. 1: Composant d'une éolienne.

**1. Tour :** La tour a une fonction structurelle de soutien. Elle permet de placer l'ensemble de l'éolienne à la hauteur désirée et de supporter la masse du système.

**2. Pales :** Elles constituent ce que l'on appelle le rotor et se mettent en rotation sous l'effet du vent.

**3. Arbre lent :** Cette pièce fait le lien entre les pales (2) et la boîte d'engrenage (10). Il tourne à la même vitesse que les pales.

**4. Arbre rapide :** L'arbre rapide transmet la puissance de la boîte de vitesse (10) à l'alternateur (9). Il tourne à la vitesse spécifique de l'alternateur (9) grâce à la modification obtenue par la boîte d'engrenage (10).

**5. Nacelle :** La nacelle est la « boîte » qui abrite l'ensemble des composantes en haut de la tour (1).

**6. Anémomètre :** Il mesure la vitesse du vent. Relié à un système de contrôle (10), il permet d'activer les mécanismes de freinage de l'éolienne afin de ralentir voire d'arrêter l'éolienne si les vents sont trop forts.

**7. Girouette :** Indique la direction du vent. L'information est transmise au système d'orientation (8) via un système de contrôle électronique (11).

**8. Système d'orientation :** Il permet d'orienter l'éolienne selon la direction du vent.

**9. Alternateur :** L'alternateur est composé de deux parties : un rotor et un stator. Le rotor (électroaimant mobile) est lié à l'arbre rapide et tourne à l'intérieur du stator (bobines de cuivre immobiles). L'interaction magnétique entre le rotor et le stator de l'alternateur crée le courant électrique dans les bobines.

**10. Boîte d'engrenage :** La boîte d'engrenage ou boîte de vitesse est un système de transmission de puissance qui permet de réduire ou d'augmenter la vitesse de rotation d'un mécanisme. Dans le cas de la boîte de vitesse d'un aérogénérateur, on utilise généralement un système d'engrenages. Il s'agit de roues dentées de différents diamètres avec un nombre de dents différents capable de multiplier la vitesse de rotation entre les deux arbres. Ainsi, le rapport des vitesses de rotation des arbres d'entrée et de sortie est égal au rapport des diamètres des roues dentées. Le diamètre de l'engrenage du côté de l'alternateur (sortie) est  $R$  fois plus petit que celui du côté des pales (entrée) et donc, la vitesse de l'arbre rapide est  $R$  fois plus élevée que celle de l'arbre lent.

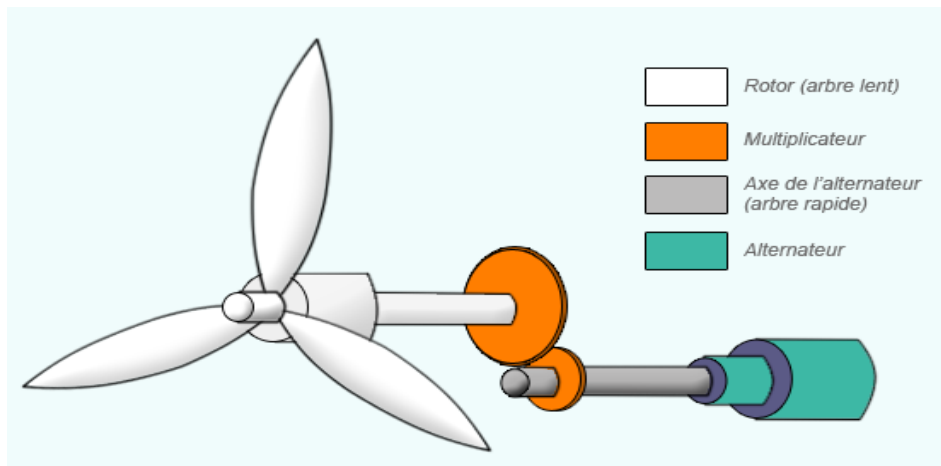


Fig.I. 2: Boîte d'engrenage.

### I.3 Stratégie de fonctionnement d'une éolienne

La production de l'électricité par une éolienne est réalisée par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette transformation passe par de nombreuses étapes.

**a. La transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par les pales :** Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion, la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor.

**b. L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur :** Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. Cependant la plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Dans le cas où le générateur est beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd, la présence du multiplicateur n'est pas nécessaire.

#### c. La production de l'électricité

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur.

### I.4 Modélisation d'une éolienne

L'énergie captée par la turbine est transmise à la génératrice. Le système mécanique complet comprend donc les éléments suivants :

- Un moyeu sur lequel sont reliées les pales.
- L'axe lent.

- Le multiplicateur de vitesse.
- L'axe rapide (rotor de la génératrice).

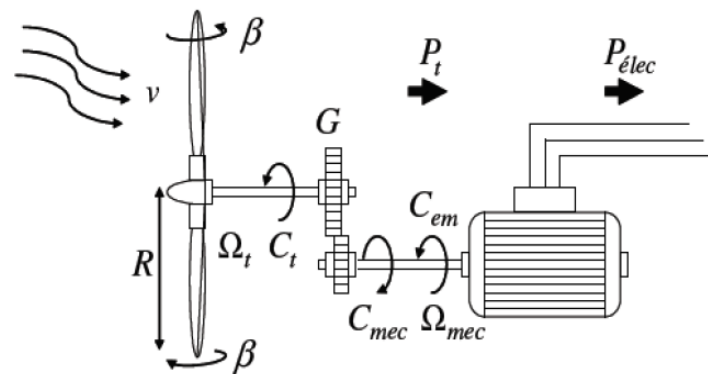


Fig.I. 4: Eléments du système mécanique complet.

Ce système peut être représenté sous une autre forme.

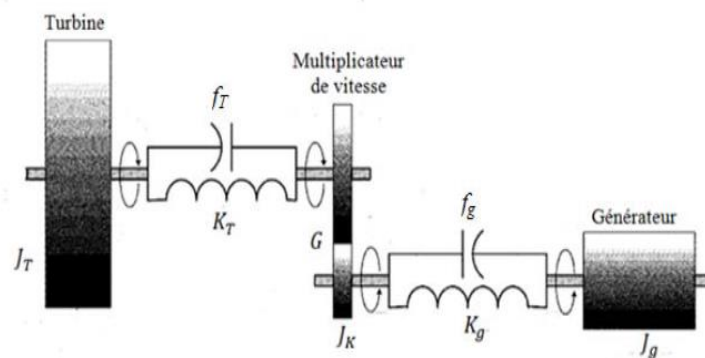


Fig.I. 3: Modèle de l'éolienne.

Ce modèle est très complexe et sa modélisation exige la connaissance de plusieurs paramètres difficile à obtenir. Néanmoins nous pouvons poser des hypothèses que nous trouvons réalistes et qui sont acceptées dans divers ouvrages [1,2].

#### I.4.1 Modélisation du vent

La ressource en vent est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent.

Le modèle de vent est simplifié car la direction n'est pas prise en compte : on considère ainsi une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

Dans cette étude, le profil de vent particulier correspond à des mesures issues de mesures réelles, modélisé sous forme déterministe par une somme d'harmonique.

$$V(t) = 6.5 + (0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t)) \quad \text{I.1}$$

### I.4.2 Bilan des forces sur une pale

La Figure I.5 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $\vec{V}$ . Le vecteur  $\vec{V}_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $\vec{V}_{res}$ . L'action du vent sur la pale produit une force  $\vec{F}_{res}$  qui se décompose en une poussée axiale  $\vec{F}_{ax}$  directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation  $\vec{F}_{rot}$  qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée.

Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

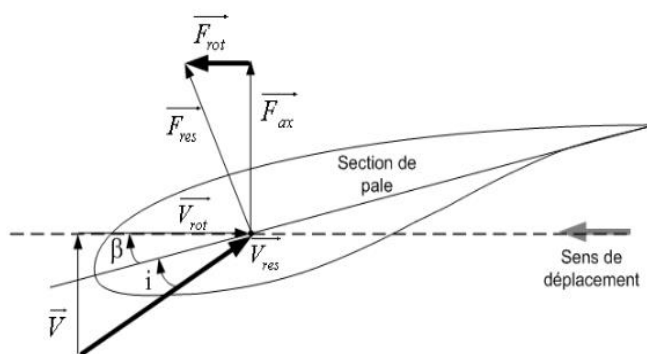


Fig.I. 5: Bilan des forces sur une pale.

### I.4.3 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine :

La partie mécanique de la turbine étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse relié à un multiplicateur de gain qui entraîne une génératrice électrique comme la montre la figure (Figure I.6).

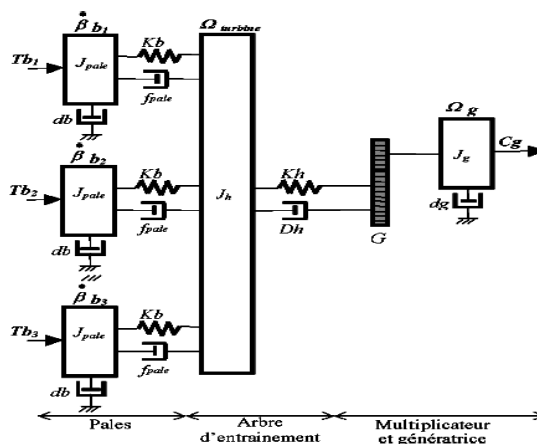


Fig.I. 6: Représentation du système mécanique de l'éolienne.



On considère que les trois pales sont de conceptions identiques et possèdent :

- La même inertie  $J_{pale}$  ; La même élasticité  $K_b$  ; Le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $f_{db}$ .
- Etant orientable, elles présentent toutes un coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ .
- Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées,
- Chaque pale reçoit une force  $T_{b1}$ ,  $T_{b2}$ ,  $T_{b3}$  qui dépend de la vitesse de vent.
- L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :
- Son inertie  $J_h$  ; Son élasticité  $K_h$  ; Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $D_h$ .

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 notée  $\Omega_{mec}$ . Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ( $T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$ ), 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 par la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air ( $f_g$ ) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine 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 I.7).

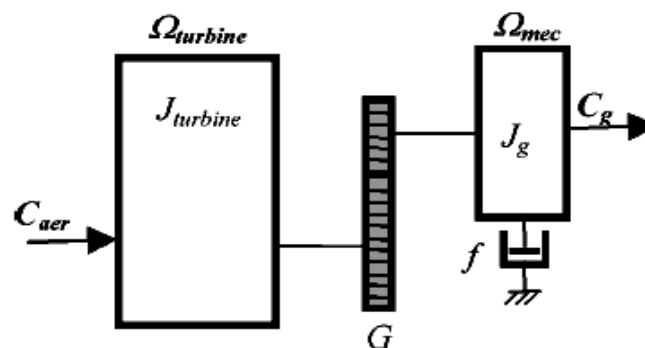


Fig.I. 7: Modèle mécanique de la turbine.

### I.4.4 Loi de Betz

La loi de Betz permet d'expliquer simplement le processus d'extraction de l'énergie cinétique contenue dans le vent, elle détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de Betz pour la première fois [3], [4]. La figure ci-dessous représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur est représentée par  $V_1$  et la vitesse en aval par  $V_2$ .

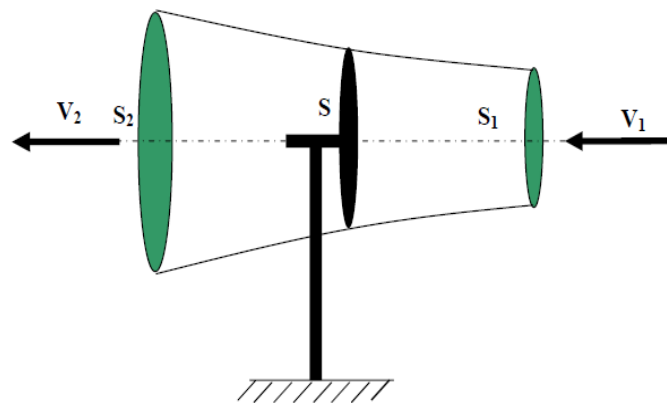


Fig.I. 8: Canal de courant d'air autour d'une éolienne.

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par la relation suivante : [3],[5].

$$m_0 = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I.1})$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval [7] :

$$P_m = \frac{m_0 \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{I.2})$$

Soit en remplaçant  $m_0$  par son expression dans (I.2), on obtient l'expression de la puissance totale disponible sur la surface  $S$  :

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (\text{I.2})$$

Le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible [7], [3],

$$[4] \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + (\frac{V_1}{V_2})) (1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} \text{ est défini comme étant le coefficient de puissance, } (C_p).$$

Le coefficient  $C_p$  varie en fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega t$ , et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage [4], [5], [6].

Il peut être représenté en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ . D'après [4], [5], [6], la valeur maximale possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz, est de  $(16/27)$  soit 0.593.

En réalité, cette limite n'est jamais atteinte, vu que le meilleur rendement des machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de BETZ ; globalement on ne récupère que 40% de l'énergie due au vent. L'expression du rendement aérodynamique s'écrit comme suit [4], [6] :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p \max}$$

$C_{p \max}$  : représente la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance  $C_p$ . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale  $\lambda_{opt}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale  $V_n$  et une vitesse de rotation nominale  $\Omega_n$  [3], [4], [6].

#### I.4.5 Calcul de coefficient de puissance

Le coefficient de puissance  $C_p(\lambda, \beta)$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine, plusieurs expressions du coefficient de puissance ont été proposées dans la littérature [7, 8,9], ou par des constructeurs de turbines éoliennes.

L'expression de coefficient de puissance utilisée dans notre étude est donnée par [10] :

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 * (c_2 * \frac{1}{\lambda_i} - c_3 * \beta - c_4) * \exp(\frac{-c_5}{\lambda_i}) + c_6 * \lambda_i \quad (I.4)$$

$$\text{Avec : } \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008 * \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}$$

$$C1=0.5176$$

$$C2=116$$

$$C3=0.4$$

$$C4=5$$

$$C5=21$$

$$C6=0.0068$$

A partir de l'équation (I.4), on peut représenter le coefficient de puissance  $C_P$ , calculé, en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  pour différents angles d'inclinaison des pales  $\beta$ , comme il est indiqué sur la figure suivante.

La figure suivante représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$ , et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ .

On remarque que le coefficient de puissance prend une valeur pour chaque angle d'orientation des pales et ratio de la vitesse, il atteint son maximum (0.48) pour un angle de calage de  $0^\circ$  et une ration de la vitesse d'une valeur de 8.1, ce qui correspond au maximum de la puissance mécanique récupéré.

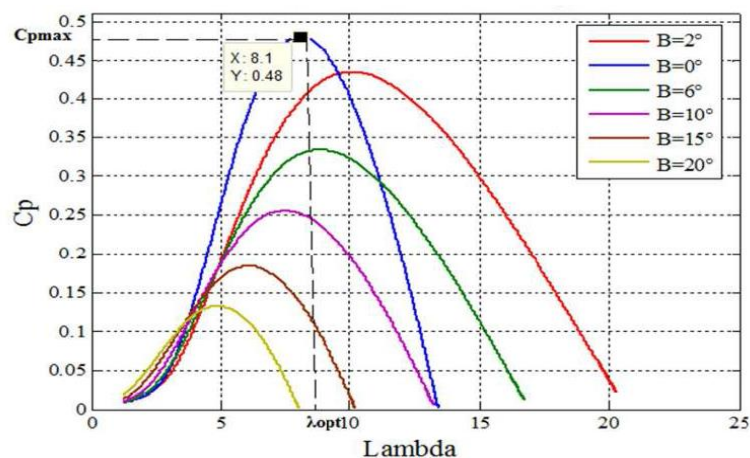


Fig.I. 9: Schéma du Coefficient aérodynamique ( $C_p$ ) en fonction du ratio de vitesse de la turbine ( $\lambda$ ).

#### I.4.6 Calcul de la vitesse spécifique ou normalisée (Tip-Speed-Ratio)

La vitesse spécifique ou normalisée  $\lambda$  représente le rapport de la vitesse linéaire au bout de pales de la turbine  $\Omega_t R_t$  sur la vitesse instantanée du vent  $V$ , comme elle est représentée sur la figure ci-dessous et donnée par l'expression suivante [3], [4] :

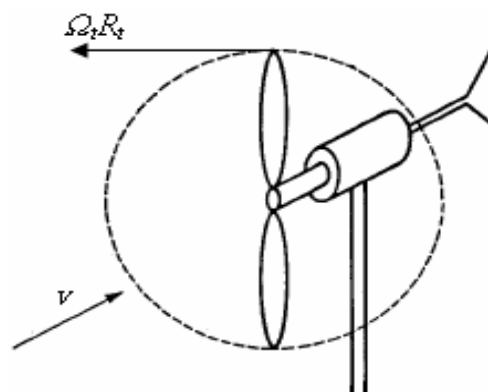


Fig.I. 10: Représentation de la vitesse spécifique

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (\text{I.5})$$

#### I.4.7 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [4].

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{I.6})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{I.7})$$

#### I.4.8 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est transmise à 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. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (\text{I.8})$$

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 :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{I.9})$$

Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{vis}$ , et le couple issu du multiplicateur  $C_g$ .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{I.10})$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$  :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (I.11)$$

A partir des équations précédentes, nous pouvons établir le modèle de la turbine dont le schéma bloc est donné sur la figure ci-dessous. Avec comme entrées de la turbine ; la vitesse du vent  $v$ , l'angle d'orientation des pales  $\beta$ , et la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_T$ .

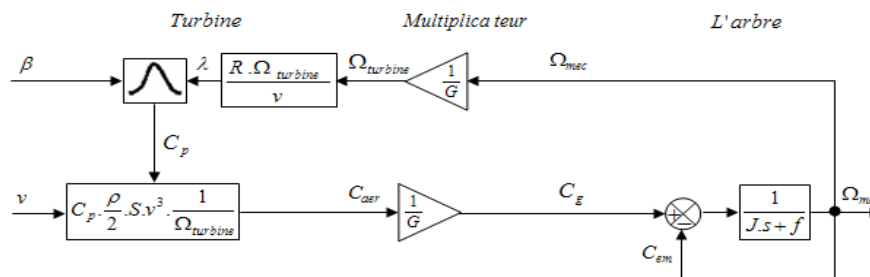


Fig.I. 11: Schéma bloc de la turbine.

Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur, le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

Le modèle de l'arbre montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle d'orientation des pales et le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

#### I.4.9 Résultats de simulation en boucle ouverte

Le modèle de la turbine a été validé par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats présentés dans la suite sont obtenus pour une turbine de 10kW dont les paramètres sont définis dans l'annexe A. Ils sont réalisés en boucle ouverte afin d'observer le comportement de la turbine face aux fluctuations du vent.

La Figure (I.12) présente le profil du vent de valeur moyenne de (6.5 m/s) appliqué à la turbine. Cette valeur été estimée dans le sud-ouest de l'Algérie.

- Les Figures (I.13 et I.14)) montrent l'évolution du coefficient de puissance et de la vitesse spécifique au cours du temps. On constate qu'ils ne sont pas maintenus à leur valeur nominale
- ( $C_{pnom}=048$ , et  $\lambda_{nom}=8.1$ ) et qu'ils varient avec la variation du vent.
- D'après la Figure (I.15), la variation de la vitesse mécanique est adaptée à la variation du vent, ce qui montre l'influence directe du vent sur la vitesse de rotation de l'arbre. On note aussi un grand écart entre la vitesse mécanique et sa valeur de référence.

- Les performances dynamiques obtenues montrent que la puissance extraite n'est pas optimisée.

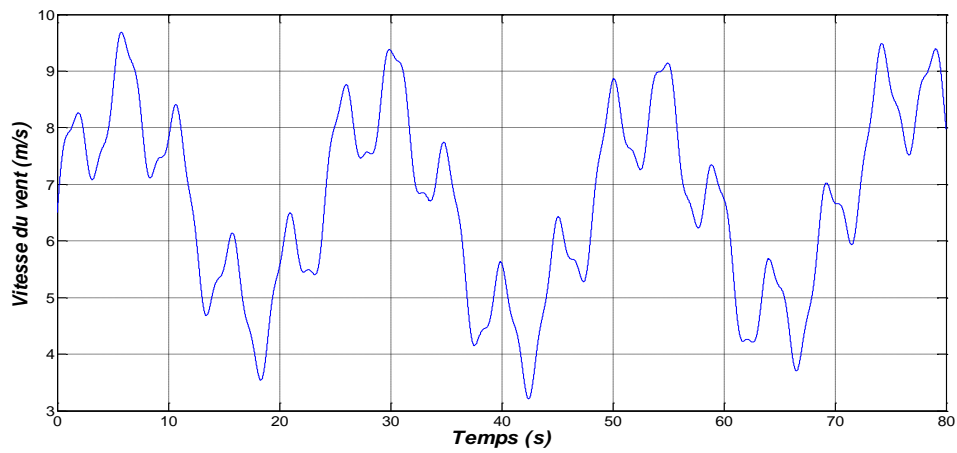


Fig.I. 12: Allure de la vitesse du vent.

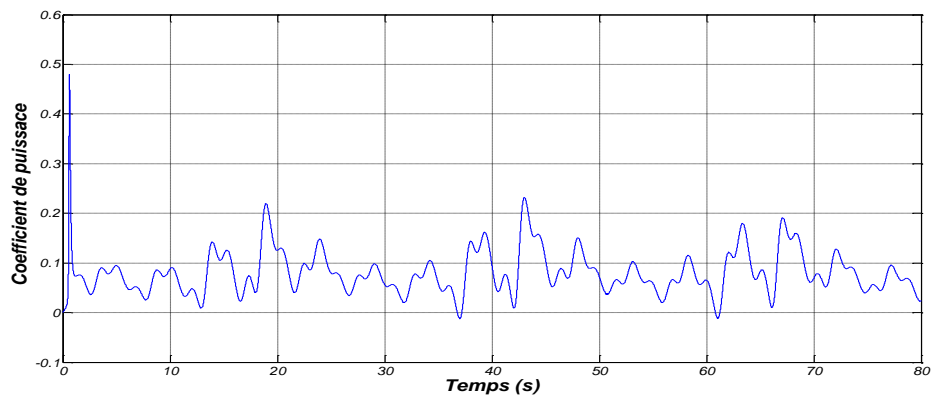


Fig.I. 13: Allure du coefficient de puissance en boucle ouverte.

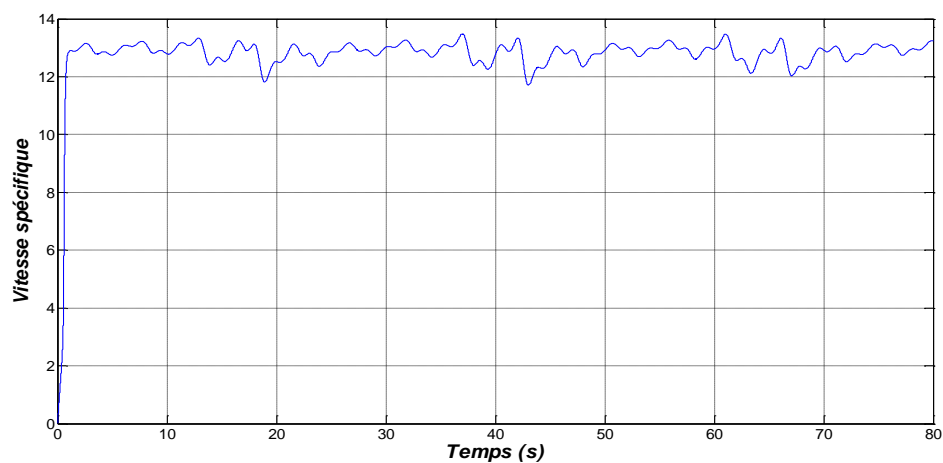


Fig.I. 14: Allure de la vitesse spécifique en boucle ouverte.

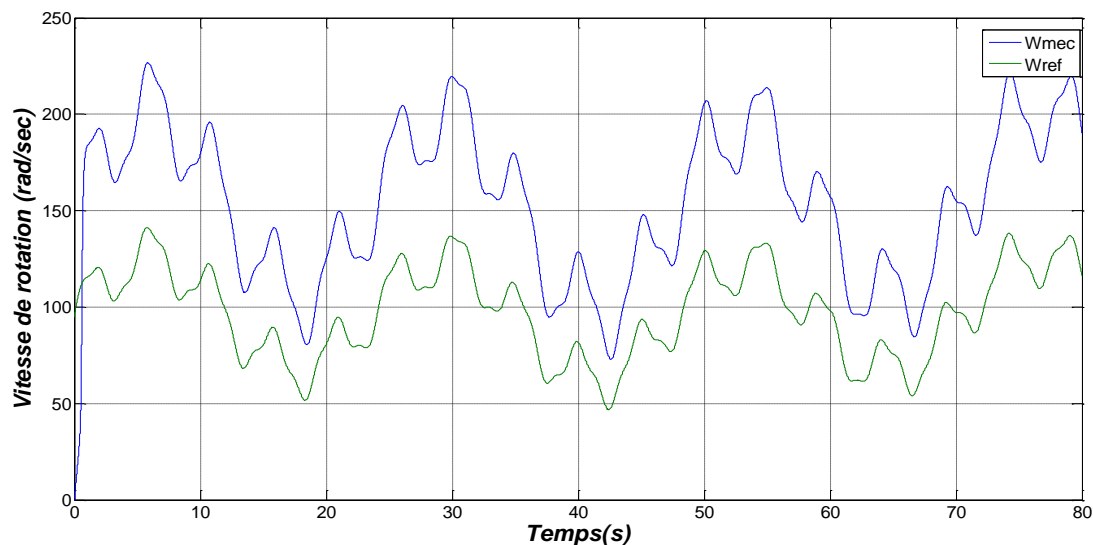


Fig.I. 15:Allure de la vitesse de rotation en boucle ouverte

### I.5 Stratégies de commande de la turbine éolienne :

Une turbine éolienne est un dispositif qui capture une partie de l'énergie du vent et la convertit en un travail utile. Elle doit être conçue de sorte à réduire au maximum le coût de production et d'assurer une exploitation sûre en respectant les normes de la qualité d'énergie. Ce qui implique une série d'objectifs étroitement liés et parfois en conflit. Par conséquent, ils ne devraient pas être suivis séparément et peuvent être arrangés de la manière suivante [11,12] :

- **Capture de l'énergie** : Maximisation de la capture d'énergie en tenant compte des restrictions d'exploitation, telles que la puissance nominale et la vitesse nominale.
- **Charges mécaniques** : protection du système éolien des charges mécaniques excessives.
- **Qualité de l'énergie** : production de l'énergie conformément aux normes d'interconnexion.

Ces objectifs permettent de tracer la caractéristique que la turbine doit suivre pour répondre aux exigences de la commande, comme il est indiqué sur la Figure (I.16). Elle peut être décomposée en quatre zones.



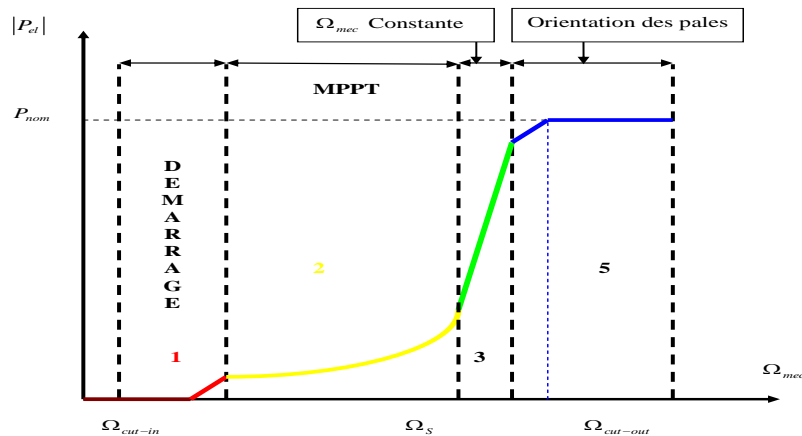


Fig.I. 16: Caractéristique puissance – vitesse d’une éolienne.

**Zone 1 :** C’est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse  $\Omega_{cut-in}$ .

**Zone 2 :** Correspond aux faibles vitesses du vent, lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l’extraction de la puissance maximale du vent est appliqué MPPT, (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de la puissance, l’angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, ce processus continue jusqu’à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.

**Zone 3 :** Au-delà, l’éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs très importantes, jusqu’à 90% de la puissance nominale ( $P_{nom}$ ).

**Zone 4 :** Arrivée à la puissance nominale, une limitation de la puissance générée est effectuée à l’aide d’un système d’orientation des pales : pitch control. Au-delà de la vitesse  $\Omega_{cut-out}$ , un dispositif d’urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

### I.5.1 Maximisation de la puissance extraite dans la zone 2

Dans cette zone, on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le système de contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l’éolienne de manière à rester aux alentours de la valeur optimale de la vitesse spécifique  $\lambda = \lambda_{opt}$ . Comme l’angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l’éolienne est alors égal à sa valeur maximale  $C_{pmax}$  [13,14], ce qui permet de maximiser la puissance obtenue.

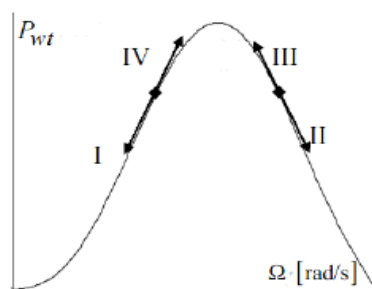
La technique d'optimisation de la puissance utilisée dans cette zone de fonctionnement des éoliennes à vitesse variable est la technique de la MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter, qui consiste à déterminer la vitesse de la turbine permettant d'obtenir le maximum de puissance générée. Pour avoir une action complète sur la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_t$ , on s'intéresse au sens de variation de la grandeur  $\frac{dP}{d\Omega_t}$ . Ce gradient vaut zéro lorsque l'on a atteint le maximum de la puissance, point que l'on recherche. On le déduit à partir de l'équation [15.12] :

$$\frac{dP}{d\Omega_t} = \frac{dP}{dt} * \left( \frac{d\Omega_t}{dt} \right) \quad \text{I.12}$$

Cette technique peut être résumée sur le tableau I.1 ainsi que la figure I.2 représentée ci-dessous :

**Table 1: Fonctionnement de la MPPT.**

$\frac{dP}{d\Omega_t}$ \ $\frac{d\Omega_t}{dt}$	< 0	> 0
< 0	I - $\Omega \nearrow$	II - $\Omega \searrow$
> 0	III - $\Omega \searrow$	IV - $\Omega \nearrow$



**Fig.I. 17: Principe de fonctionnement de la MPPT.**

Basé sur le principe de fonctionnement de la MPPT, la vitesse de rotation est commandée dans le sens d'approcher le maximum de la puissance disponible. La recherche du maximum de puissance peut se faire par action sur le couple (commande indirecte de la vitesse) ou par action direct sur la vitesse de rotation (commande directe de la vitesse). Dans le cas de notre turbine nous allons réguler la vitesse.

## I.5.2 Commande en vitesse de la turbine :

### I.5.2.1 Conception de correcteur de vitesse par PI classique :

Cette structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour atteindre les objectifs de commande, une boucle de vitesse avec un régulateur proportionnel intégral est utilisée. On supposera pour notre étude que la machine électrique et son variateur sont idéaux, donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{emref} \quad \text{I.13}$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être imaginés. La vitesse est influencée par l'application de trois couples : le couple éolien, le couple électromagnétique et le couple des frottements visqueux.

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f\Omega_{mec} \quad \text{I.14}$$

Avec :

$C_{em}$  : couple produit par la génératrice ;  $C_g$  : couple issu du multiplicateur ;

La structure de commande consiste à régler le couple qui apparaît sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence par la relation suivante :

$$C_{emref} = PI(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad \text{I.15}$$

Le calcul du régulateur est basé sur la dynamique en boucle fermée, en utilisant le principe de la compensation des pôles. La boucle de régulation de la vitesse est représentée par le schéma bloc suivant :

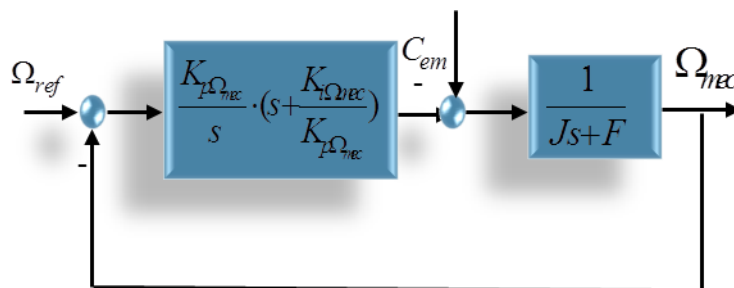


Fig.I. 18: Schéma bloc de la commande directe de vitesse de la turbine avec un régulateur PI

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$\frac{K_{p\_}\Omega_{mec}}{s} \cdot \left( s + \frac{K_{i\_}\Omega_{mec}}{K_{p\_}\Omega_{mec}} \right) \tag{I.16}$$

Par compensation on trouve :

$$\frac{F}{J} = \frac{K_{i\_}\Omega_{mec}}{K_{p\_}\Omega_{mec}} \tag{I.17}$$

La fonction de transfère en boucle fermée est la suivante :

$$G(s) = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{ref}} = \frac{K_p / J}{K_p / J + s}$$

La fonction de transfert du système du premier ordre s'écrit comme suite :

$$G(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \tag{I.18}$$

Avec :  $\tau = \frac{J}{K_p * \omega_{mec}}$

On trouve :

$$K_{p\_}\Omega_{mec} = \frac{J}{\tau}, K_{i\_}\Omega_{mec} = \frac{F}{\tau}$$

A partir des expressions de la turbine éolienne présentées dans le chapitre précédent, on déduit le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse mécanique.

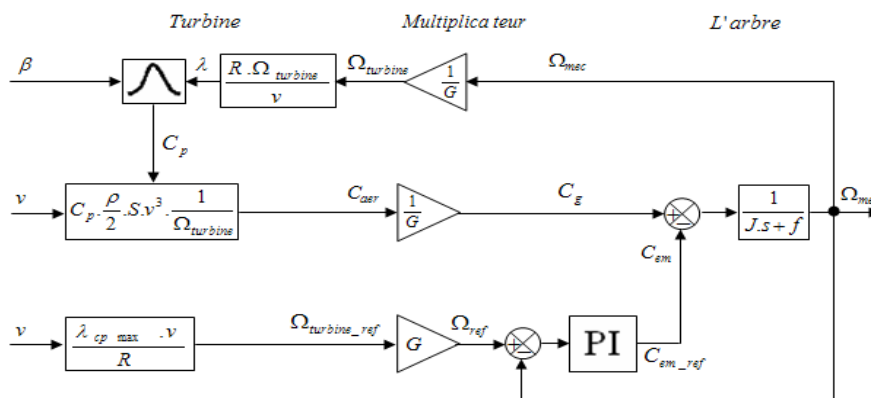


Fig.I. 19: Schéma bloc de la commande directe de vitesse de la turbine avec un régulateur PI.

La référence de la vitesse de la turbine est celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse  $\lambda_{cpmax}$  (pour  $\beta$  égal à  $0^\circ$ ) permettant d'obtenir la valeur maximale du  $C_p$ . (Figure I.20). Elle est donnée par :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{cpmax} v}{R} \quad \text{I.19}$$

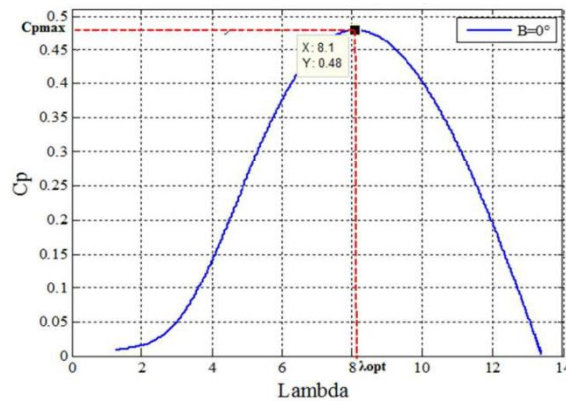


Fig.I. 20: Représentation du Point de fonctionnement optimal de la turbine

### I.5.2.2 Résultats de simulation :

Le modèle de la turbine a été validé par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink, les résultats présentés dans la suite sont obtenus pour une turbine de 10KW dont les paramètres sont définis dans l'annexe A. Ils sont réalisés dans la Zone 2 afin d'exploiter le maximum d'énergie du vent disponible, cette énergie est maximisée en réglant le coefficient de puissance  $C_p$ , qui dépend de la vitesse de la génératrice ou encore de la ration de la vitesse  $\lambda$ .

Le maintien du coefficient de puissance nécessite la conception d'une stratégie de commande (MPPT) permettant la maximisation de la puissance électrique générée, en ajustant la vitesse de rotation à sa valeur de référence par le biais d'un régulateur classique de type PI, quelle que soit la vitesse considérée et le degré de perturbation du vent. La figure (I.21) présente le profil du vent de valeur moyenne de (6.5 m/s) appliqué à la turbine.

D'après la Figure (I.24) la variation de la vitesse mécanique est adaptée à la variation du vent, ce qui montre l'influence directe du vent sur la vitesse de rotation de l'arbre, on constate aussi que la vitesse mécanique suit parfaitement sa valeur de référence, ce qui confirme l'efficacité de la commande appliquée. Ni au moins un zoom sur ce graphe montre qu'il existe une erreur entre la vitesse de rotation

et sa référence, cette différence est exprimée par l'équation :  $er = \Omega_{ref} - \Omega_{mec}$  où l'erreur tend vers zéro.

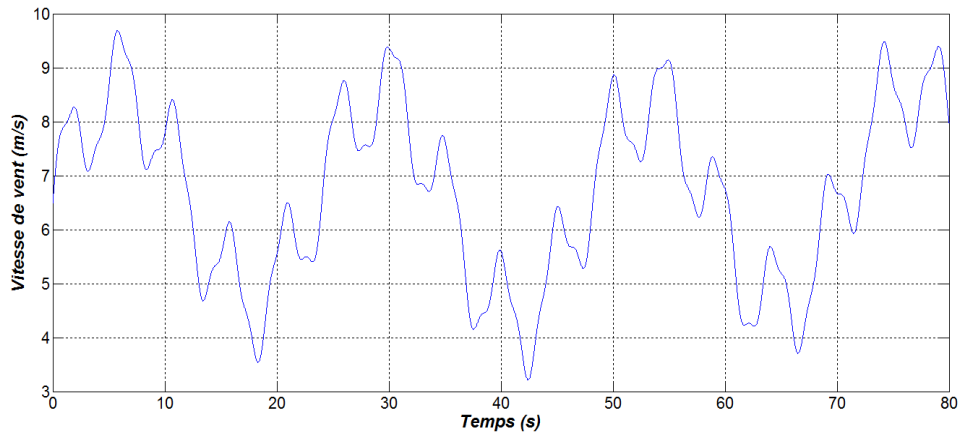


Fig.I. 21: Allure de la vitesse du vent.

- Application du régulateur PI

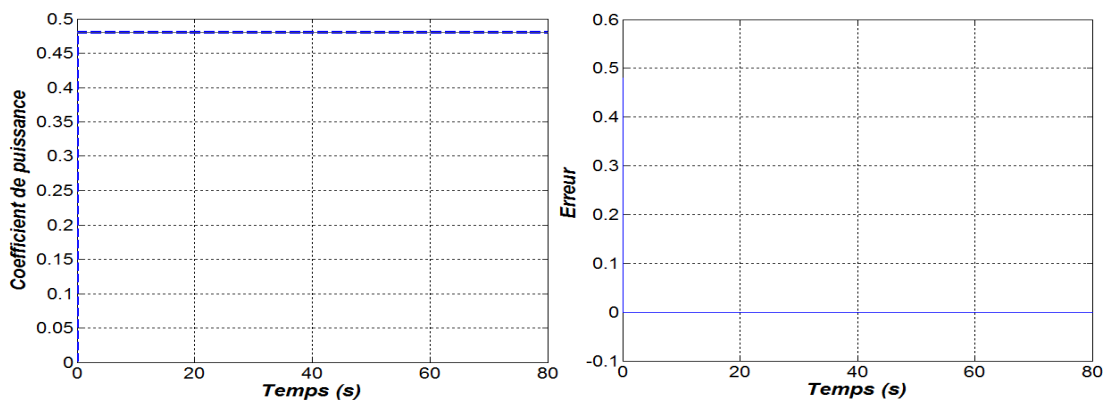


Fig.I. 22: Allure du coefficient de puissance avec un régulateur PI.

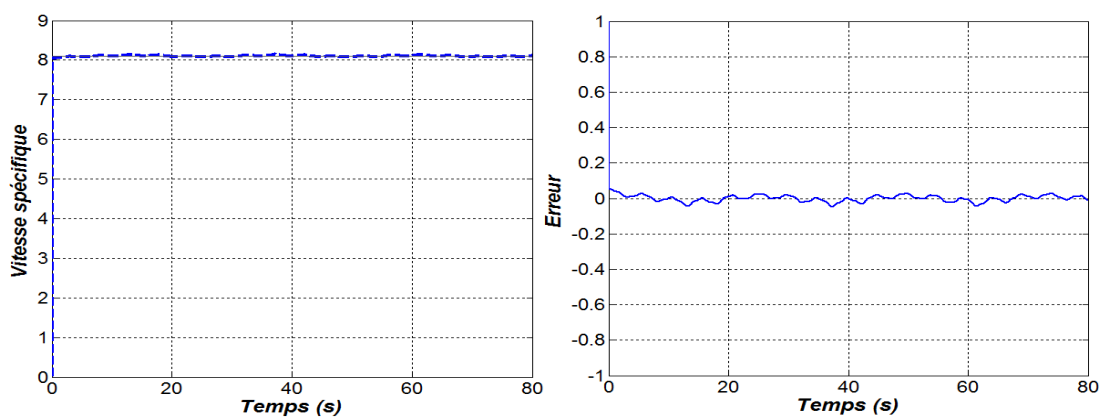


Fig.I. 23: Allure de la vitesse spécifique avec un régulateur PI.

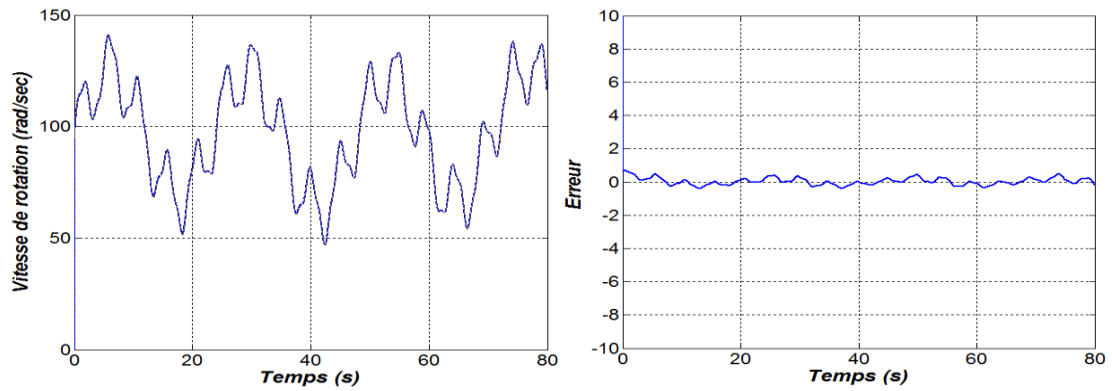


Fig.I. 24: Allure de la vitesse de rotation avec un régulateur PI.

## I.6 Conclusion :

A travers ce chapitre, les modèles de deux parties essentielles du système de conversion éolienne ont été établis, la première partie représente la turbine et l'arbre de la génératrice. Quant à la deuxième partie, elle concerne à vitesse variable, ont l'avantage d'imposer leur vitesse à celle du vent ce qui nécessite la mise en œuvre d'une stratégie de commande (MPPT) pour extraire le maximum de puissance. Dans cette partie, en utilisant des régulateurs classiques de type PI.

# Chapitre II

## Systeme Photovoltaïque



## II.1. Energie solaire photovoltaïque :

### II.1.1. Définition :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie [16]. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension  $I(V)$  non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [17].

### II.1.2. L'effet photovoltaïque et le principe de conversion :

L'effet photovoltaïque permet de transformer directement la lumière du soleil captée par les panneaux solaires en énergie électrique, par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un surplus d'électrons et l'autre un manque d'électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p.

Actuellement, la production photovoltaïque est à base de silicium (parce que, c'est un matériau stable et abondant sur terre). [18]

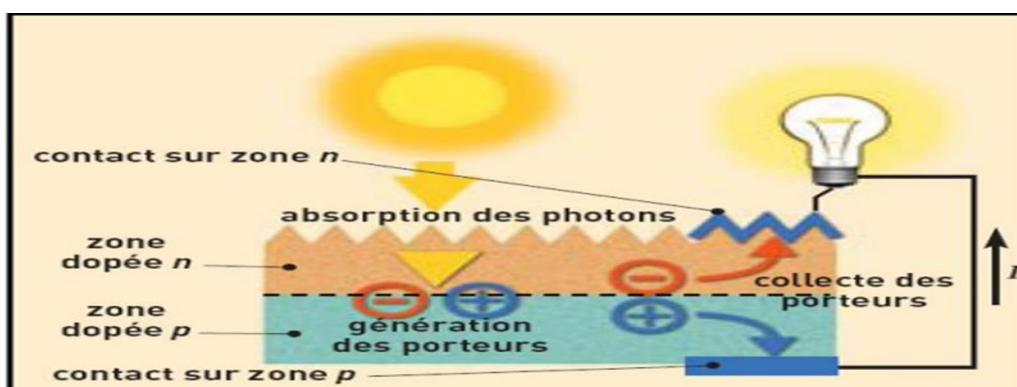


Fig.II. 1: Principe de la conversion photovoltaïque.

### II.1.3. Différents types des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres.

Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [19].

#### II.1.3.1 Cellules monocristallines :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal (Voir Figure II.2). Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer 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 traitements (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. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme.

Elles ont un rendement de 15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse [16].

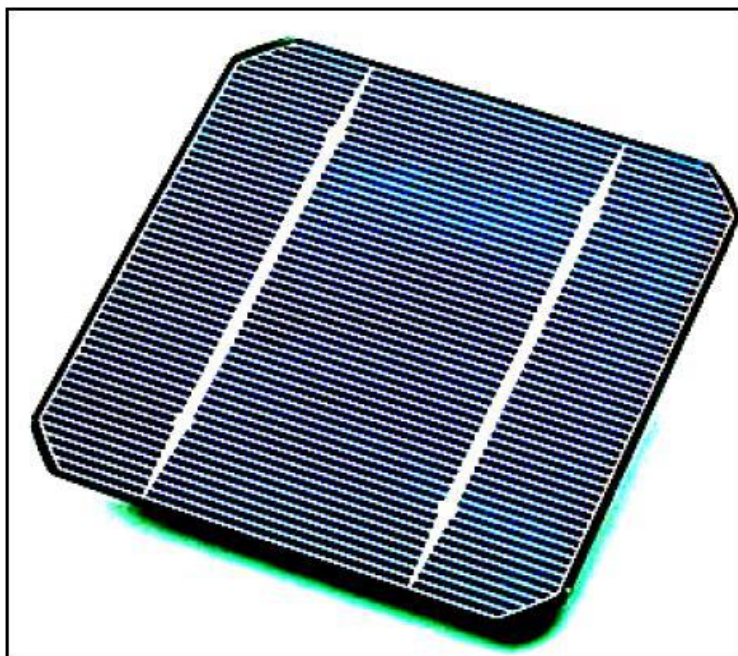


Fig.II. 2: Cellule photovoltaïque (monocristalline)

### II.1.3.2. Cellules polycristallines :

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes), (Voir Figure II.3). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées.

L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure Polycristalline. Durée de vie estimée : 30 ans [16].

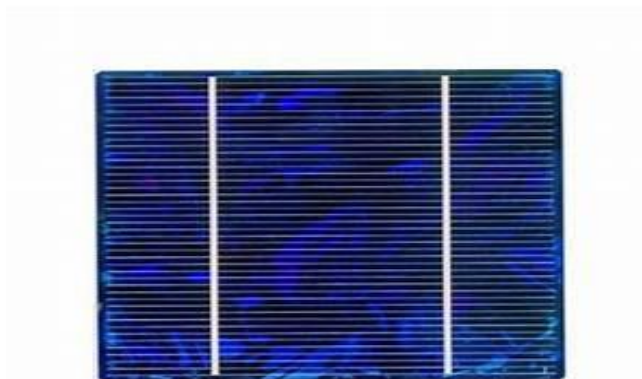


Fig.II. 3: Cellule PV poly-cristalline.

### II.1.3.3. Cellules amorphes :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies Polycristallines ou monocristallines.

Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première [16].

Table II 1: Comparatif des différentes technologies :

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium monocristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production. * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium polycristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production, Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

#### II.1.4. Les caractéristiques de cellules PV :

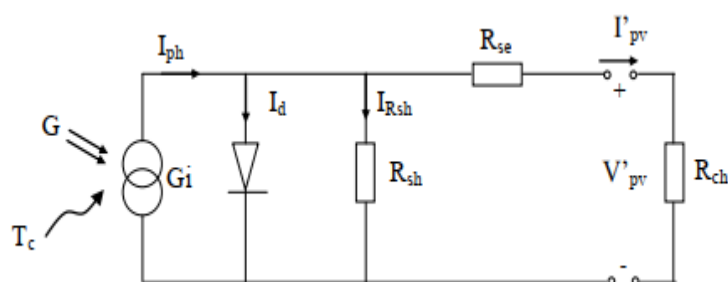


Fig.II. 4:schéma équivalent d'une cellule PV

Avec :

$G_i$  : Source de courant parfaite.

$R_{sh}$  : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

$R_{se}$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact)

$D$  : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

$R_{ch}$  : Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré d'une cellule solaire.

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants :

- Le courant de court-circuit  $I_{cc}$
- La tension en circuit ouvert  $V_{co}$
- Facteur de forme  $FF$
- Le rendement de conversion d'énergie  $\eta$

#### II.1.4.1. Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :

Il correspond au courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule PV est nulle dépend de l'éclairement et de la température. Dans le cas idéal ;  $R_{se}$  est nulle et  $R_{sh}$  tend vers infinie), ce qui fait que ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$ .

#### II.1.4.2. La tension du court ouvert ( $V_{co}$ ) :

C'est la tension  $V_{co}$  pour laquelle le courant débité par la cellule est nul c'est-à-dire cellule non connectée à une charge.

Elle est exprimée comme suite :

$$V_{co} = V_t * \ln (I_{ph}/(I_0+1)) \quad \text{avec : } V_t = (\alpha * K * T) / e \quad (\text{II.1})$$

Représentant tension à température nominal,  $I_0$  le courant de saturation de la diode.

#### II.1.4.3. Facteur de forme ( $FF$ ) :

Le facteur de forme d'une cellule solaire dépend d'un ensemble de paramètres, il est défini comme le rapport d'une puissance maximale ( $P_{max}$ ) à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ) par le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ).

Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule ; il est obtenu par l'équation :

$$FF = P_{max} / (I_{cc} * V_{co}) \quad (\text{II.2})$$

#### II.1.4.4. Rendement :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée ( $P_{max}$ ) et de la puissance du rayonnement solaire incident ( $P_i$ ) reçu en surface de la cellule :

$$\eta = P_{max}/P_i \quad (II.3)$$

#### II.1.5. Modules (ou Panneaux) PV :

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Alors Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque (Voir Figure II.5). [20].

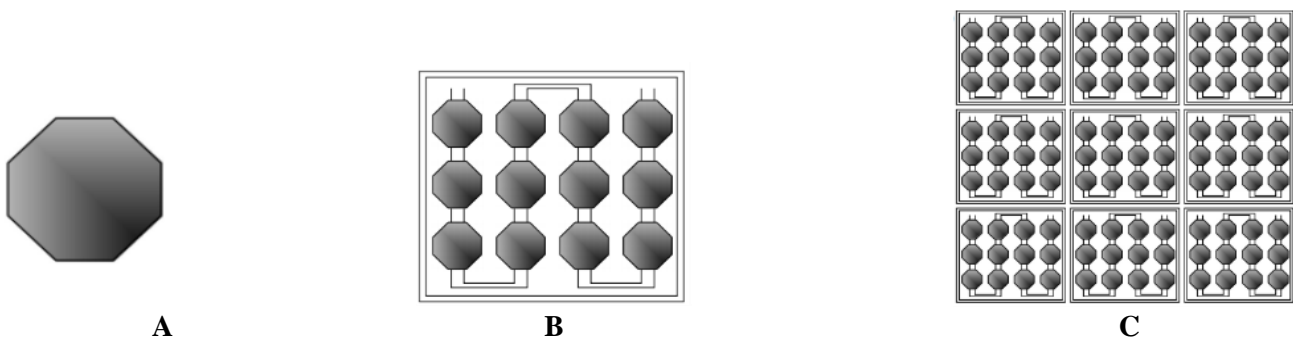


Fig.II. 5: Cellule, module et panneau photovoltaïques.

Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique [21].

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité [21].

## II.1.6. Applications des systèmes PV :

### II.1.6.1. Systèmes autonomes :

Les systèmes autonomes sont des unités de production d'électricité généralement de petites tailles qui ne sont reliées à aucun réseau de distribution. Ils peuvent être composés d'un générateur diesel, d'un générateur photovoltaïque et d'un système de stockage d'électricité. Ils utilisent en grande majorité les batteries au plomb comme stockage d'énergie. Cette technologie bénéficie en effet d'avantages, tels son faible coût (par rapport à d'autres technologies) et une large disponibilité dans le commerce. Cependant elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences nocives sur leur durée de vie. Elles fonctionnent donc en mode journalier.

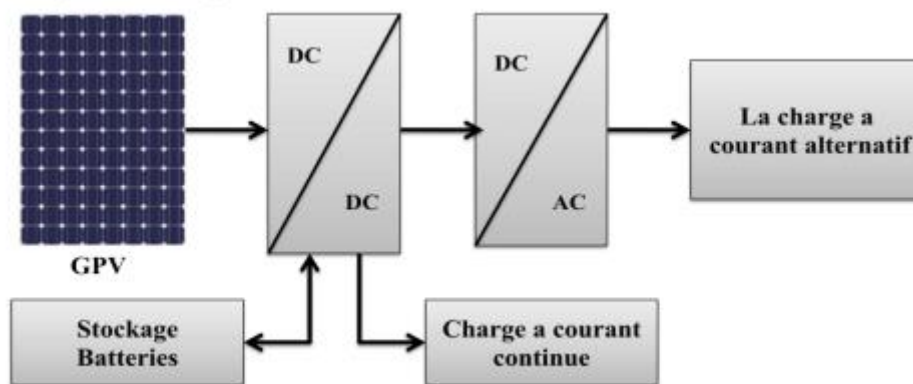


Fig.II. 6: Système autonome.

### II.1.6.2. Systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue.

Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. [22]



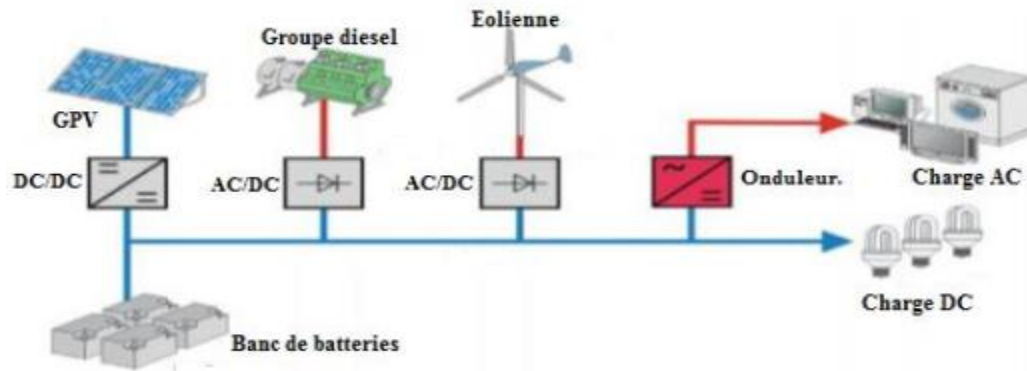


Fig.II. 7: Système hybride.

### II.1.6.3. Systèmes couplés au réseau :

Un système photovoltaïque connecté au réseau est un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur et le consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. [21]

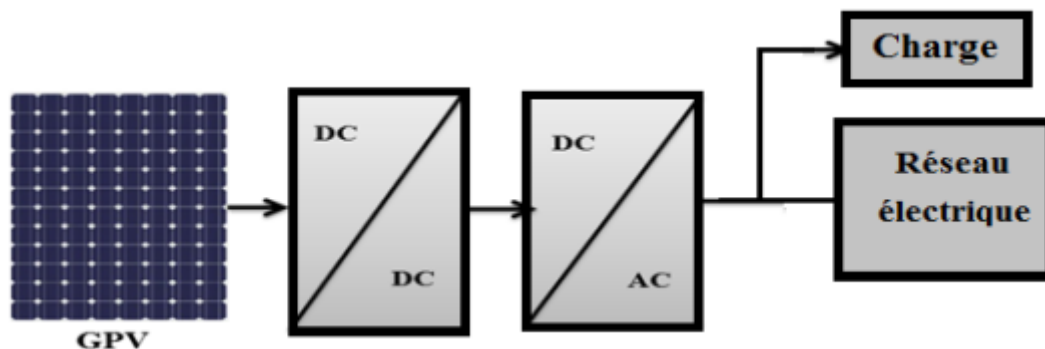


Fig.II. 8: Systèmes raccordés au réseau.

### II.1.7. Générateur photovoltaïque (GPV) :

Dans des conditions de lumière du jour standard ( $1000\text{W/m}^2$  ;  $25^\circ\text{C}$  ; AM1.5), la puissance maximale fournie par une cellule au silicium de  $150\text{ cm}^2$  est d'environ  $2,3\text{ Wc}$  Tension  $0,5\text{ V}$ . Ainsi, les cellules photovoltaïques élémentaires constituent un générateur de faible puissance insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Ainsi, les générateurs photovoltaïques sont produits en connectant un grand nombre de cellules élémentaires en série et/ou en parallèle [23].

$$V_{co(ns)} = n_s \cdot V_{co} \quad (\text{II.4})$$



Avec :  $I_{CC} = I_{CC}(ns)$  (II.5)

Avec :  $V_{co}$  : (Tension fournie par une cellule)

Une association de  $n_s$  cellules en série permet d’augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, (Voir Figure II.9). L’équation (II.4) résume les caractéristiques électriques d’une association série de  $n_s$  cellules.

De tels systèmes associés sont généralement les plus couramment utilisés dans les modules photovoltaïques commerciaux. Comme la surface de la batterie devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule n'a cessé d'augmenter au fur et à mesure que la technologie s'est développée, tandis que sa tension est restée très faible.

La combinaison en série peut donc augmenter la tension du module et donc la puissance du module. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont typiquement composés de 36 cellules en série ( $V_{co}(ns)=0.6*36=21.6V$ ) pour obtenir une Tension optimale  $V_{opt}$  proche de la tension de la batterie 12V.

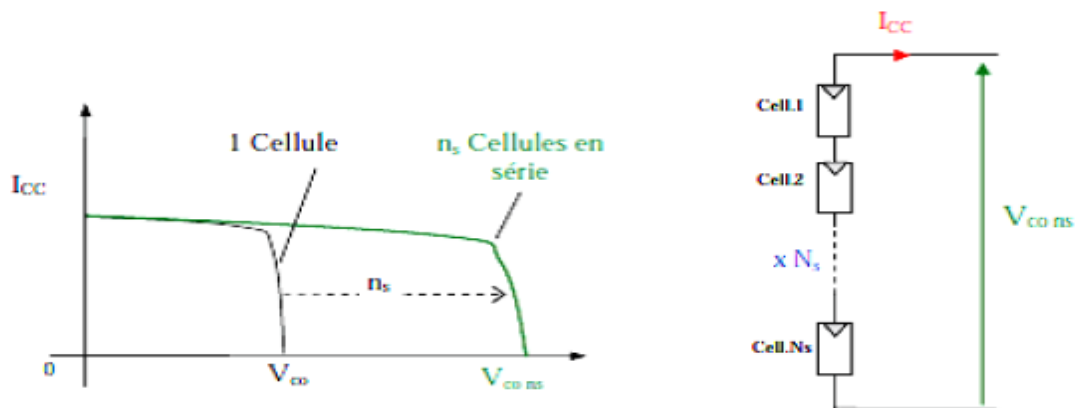


Fig.II. 9: Caractéristiques résultantes d’un groupement de  $n_s$  cellules en série. [24]

D’autre part, une association parallèle de  $n_p$  cellules est possible et permet d’accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est

obtenue par addition des courants, (Voir Figure II.10). L'équation (II.6) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $n_p$  cellules.

$$I_{cc(np)} = n_p \cdot I_{cc} \quad , \text{ Avec } V_{co(np)} = V_{co} \quad (II.6)$$

Avec :  $I_{cc}$ :(courant fourni par une cellule).

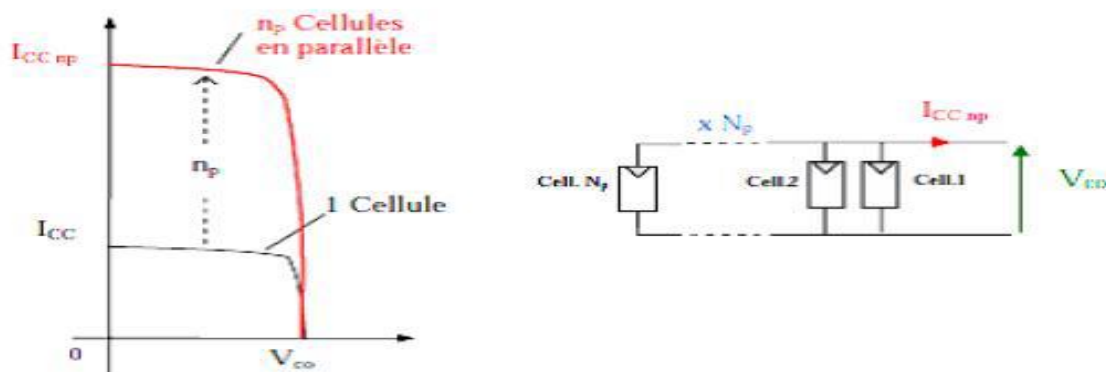


Fig.II. 10: Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle. [24]

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités.

Ainsi, pour ns cellules en série, constituant des branches elles-mêmes np en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donné par :

$$P_{pv} = n_s V_{pv} \cdot n_p I_{pv} \quad (II.7)$$

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les ( $n_s$ ,  $n_p$ ) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison). La puissance du générateur PV sera optimal si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée  $P_{max}$ . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique  $P(V)$  du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée  $V_{opt}$  et d'un courant optimal noté  $I_{opt}$  [19]. Cette caractéristique dépend fortement de l'éclaircement auquel est soumis le générateur et de sa température.

## II.1.8. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

### II.1.8.1. Avantages :

- Grande fiabilité. L'unité n'a pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement adaptée aux régions éloignées. C'est pourquoi il est utilisé sur les engins spatiaux.
- La technologie photovoltaïque a des qualités écologiques, car le produit fini est non polluant (électricité propre).
- Silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Flexibilité d'extension à tout moment pour répondre à vos besoins en énergie.
- Longue durée de vie.
- Éliminer les coûts de risque de transport associés aux énergies fossiles.

### II.1.8.2. Inconvénients :

- Fabrication coûteuse.
- Faible rendement.
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- L'énergie solaire est soumise aux conditions climatiques.

## II.2. Représentation électrique et mathématique de la cellule PV :

Les circuits équivalents couramment utilisés pour la modélisation d'une cellule PV sont connus sous le nom de modèles à diode unique et à deux diodes. Le circuit équivalent à deux diodes à une structure plus complexe et présente plus de caractéristiques non linéaires que le circuit équivalent à une diode. Par conséquent, les modèles à deux diodes sont rarement utilisés. Le Modèle de circuit à cellule unique est le plus utilisé couramment pour la simulation et la modélisation des cellules PV. Dans cette étude, le modèle de circuit équivalent à une diode est préférable. Le modèle équivalent de circuit à diode unique de la cellule solaire est donné en figure (II.11). [2]

Dans ce schéma équivalent, la jonction est caractérisée par une diode ( $d$ ), le photo-courant par une source de courant ( $I_{ph}$ ), les pertes par effet Joule une résistance sont représentés par série ( $R_s$ ), et une résistance shunte ( $R_{sh}$ ) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ( $R_s$ ).

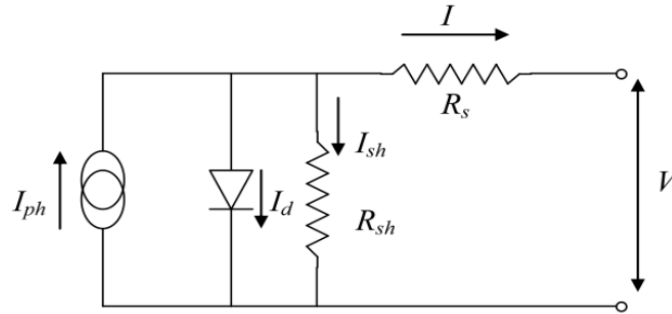


Fig.II. 11: Circuit équivalent d'une cellule PV –Modèle réel –

L'équation du courant délivré par la cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + R_s * I}{a * V_t}\right) - 1 - \frac{V + R_s * I}{R_{sh}} \right] \quad (II.8)$$

### II.2.1 Création du modèle de la cellule sous Matlab/Simulink :

Nous dessinons un diagramme Simulink du système en utilisant des intégrateurs, des gains, des sommateurs et des constantes. Nous identifions des expressions de variable et de gain basées sur les paramètres du circuit sur le diagramme Simulink.

Les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'une cellule photovoltaïque sont des équations non linéaires à plusieurs variables, certaines variables sont fournies par les fabricants, d'autres sont prises comme constantes mais d'autres encore restent à calculer.

### II.2.2. Détermination mathématique des paramètres inconnus :

Le nombre de paramètres varie selon le modèle choisi, dans notre travail nous accordons le modèle à une seule diode, où les paramètres à évaluer sont :  $I_{ph}$ ,  $I_s$ .

#### a- Détermination de $I_{ph}$ :

D'après la figure (II-8), (modèle idéal :  $R_s = 0$  et  $R_{sh} = \infty$ ), le courant de sortie  $I$  aux conditions standards (STC) est donné par :

$$I = I_{ph_0} - I_{s_0} \left[ \exp\left(\frac{V}{a * V_{t_0}}\right) - 1 \right] \quad (II.9)$$

Cette équation permet la quantification du photo-courant  $I_{ph_0}$  qui ne peut pas être déterminé autrement.

En utilisant la condition où la cellule PV est court-circuitée ( $I = I_{cc}$  et  $V = 0$ ), l'équation (II.9) devient alors :

$$I = I_{ph} - I_{s_0} \left[ \exp\left(\frac{a}{a^* V t_0}\right) - 1 \right] = I_{ph_0} \quad (\text{II.10})$$

$$I_{cc} \approx I_{ph_0} \quad (\text{II.11})$$

Notons que cette équation n'est valable que dans le cas idéal.

D'autre part, la dépendance du photo-courant de l'irradiation et de la température nous permet d'avoir la relation suivante :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_0} * (I_{ph} + K_i * \Delta T) \quad (\text{II.12})$$

b- Détermination de  $I_s$  :

Généralement la résistance  $R_{sh}$  est supposée très grande, donc en éliminant le dernier terme de l'équation (II.8), il s'ensuit :

$$I = I_{ph_0} - I_{s_0} \left[ \exp\left(\frac{V + R_s * I}{a^* V t_0}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.13})$$

En utilisant maintenant la condition où la cellule PV est en circuit ouvert ( $I = 0$  et  $V = V_{co}$ ), on peut écrire :

$$0 = I_{ph_0} - I_{s_0} \left[ \exp\left(\frac{V_0}{a^* V t_0}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.14})$$

$$I_{s_0} = \frac{I_{ph_0}}{\exp\left(\frac{V_0}{a^* V t_0}\right) - 1} \quad (\text{II.15})$$

$$I_{s_0} = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{V_0}{a^* V t_0}\right) - 1} \quad (\text{II.16})$$

D'un autre côté, le courant de saturation  $I_s$  est défini par :

$$I_s = D T^3 \left( \frac{-q^* E_g}{a^* T^* k} \right) \quad (\text{II.17})$$

Afin de se débarrasser du facteur de diffusion  $D$  de la diode, apparu dans l'équation (II-10), il faut réécrire cette équation à  $T_0$  et faire le rapport entre les deux. Ainsi, l'expression obtenue est :

$$I_s = I_{s_0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^3 \exp \left[ \frac{q * E_g}{a * k} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (\text{II.18})$$

c- Détermination de  $R_s$  et  $R_{sh}$  :

En réalité, il est impossible de négliger la résistance série  $R_s$  et la résistance parallèle  $R_{sh}$  à cause de leur impact sur l'efficacité de la cellule PV. Dans notre démarche on a procédé deux cas distincts ; un cas auquel on n'a pris en considération que de la résistance  $R_s$ , le terme  $\frac{V+R_s*I}{R_{sh}}$  étant négligé du fait que la résistance  $R_{sh}$  est très grande, et le deuxième cas où les deux résistances ont été calculées simultanément sans s'éloigner de la réalité, par la méthode qu'on va décrire ultérieurement.

- **1<sup>er</sup> cas : Calcul de  $R_s$  en posant  $R_{sh}$  :**

Du fait que les valeurs de la tension et du courant à puissance maximale ( $V_{pm}$ ) sont disponibles dans les fiches techniques, on peut alors s'en servir pour évaluer l'équation subséquente :

$$I_{pm} = I_{ph_0} - I_{s_0} \left[ \exp \left( \frac{V_{pm} + R_s * I_{pm}}{a * V_{t_0}} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.19})$$

Puisque  $\left[ \exp \left( \frac{V_{pm} + R_s * I_{pm}}{a * V_{t_0}} \right) - 1 \right] \gg 1$ , l'équation précédente peut être simplifiée comme suit :

$$I_{pm} = I_{ph_0} - I_{s_0} * \exp \left( \frac{V_{pm} + R_s * I_{pm}}{a * V_{t_0}} \right) \quad (\text{II.20})$$

On peut donc déterminer la valeur de la résistance série  $R_s$  :

$$R_s = \frac{a * V_{t_0} * \ln \left( \frac{I_{ph_0} - I_{pm}}{I_{s_0}} \right) - V_{pm}}{I_{pm}} \quad (\text{II.21})$$

- **2<sup>ème</sup> Cas : Calcul de  $R_s$  et  $R_{sh}$  :**

Afin que le modèle proposé soit plus authentique,  $R_s$  et  $R_{sh}$  sont choisies astucieusement de façon à rendre la puissance maximale calculée  $P_{max}$ , égale à la puissance de crête expérimentale  $P_{max}$ , fournie par les fabricants. Ainsi il est possible d'écrire l'équation suivante :

$$I_{pm} = \frac{P_{max,c}}{V_{pm}} = \frac{P_{max,ex}}{V_{pm}} \quad (\text{II.22})$$

$$I_{pm} = I_{ph_0} - I_{s_0} \left[ \exp\left(\frac{V_{pm} + R_s * I_{pm}}{a * V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s * I_{pm}}{R_{sh}} \quad (\text{II.23})$$

$$\frac{P_{max,c}}{V_{pm}} = I_{ph_0} - I_{s_0} \left[ \exp\left(\frac{V_{pm} + R_s * I_{pm}}{a * V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s * I_{pm}}{R_{sh}} \quad (\text{II.24})$$

$$R_{sh} = \frac{V + R_s * I_{pm}}{I_{ph_0} - I_{s_0} \left[ \exp\left(\frac{V_{pm} + R_s * I_{pm}}{a * V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s * I_{pm}}{R_{sh}} - \frac{P_{max,c}}{V_{pm}}} \quad (\text{II.25})$$

La valeur initiale de  $R_{sh}$  correspondante à la pente du segment de ligne entre le point du court-circuit ( $0, I_{cc}$ ) et le point de puissance maximale ( $V_{pm}, I_{pm}$ ) est déterminée à partir de cette équation pour  $R_s = 0$ . Ces deux valeurs sont par la suite incrémentées simultanément jusqu'à ce que la puissance maximale modélisée soit égale à celle disponible dans la fiche technique du fabricant. [3]

### II.2.3. Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque :

a- Modules photovoltaïques choisis sans commande :

En décortiquant notre système par l'utilisation de l'environnement MATLAB /Simulink, notre modèle photovoltaïque peut être représenté comme suit

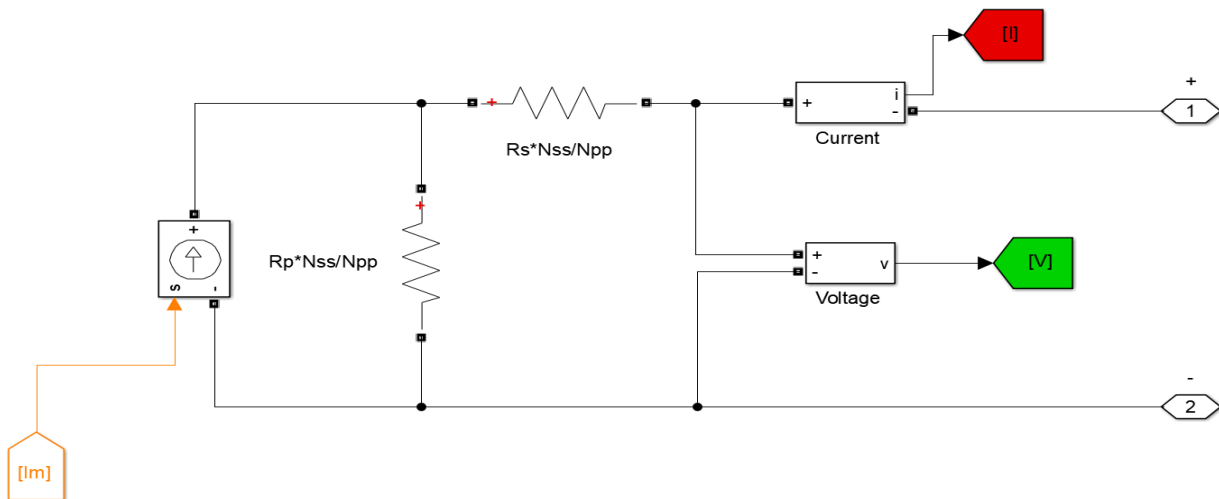


Fig.II. 12: Modèle du circuit équivalent d'un champ PV sous Simulink

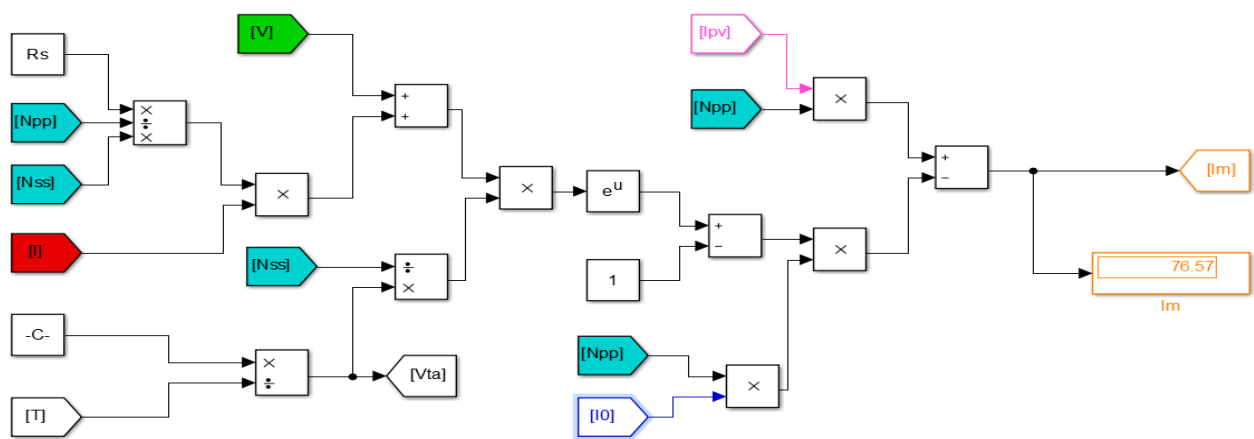


Fig.II. 13: Schéma bloc de calcul du courant maximal

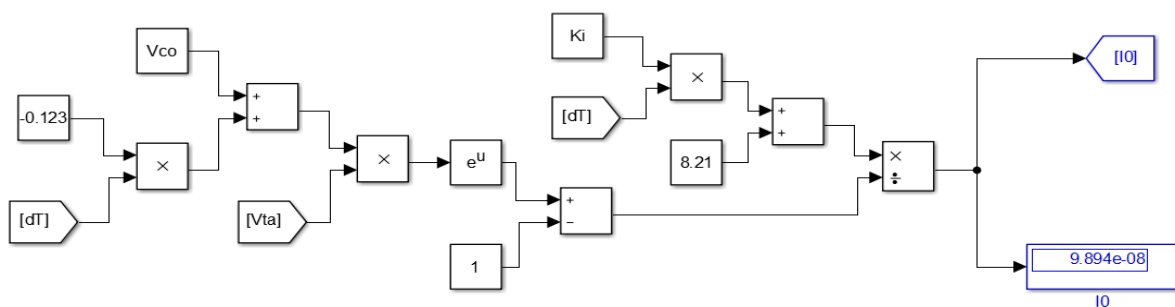


Fig.II. 14: Schéma du calcul de I0 sous Simulink



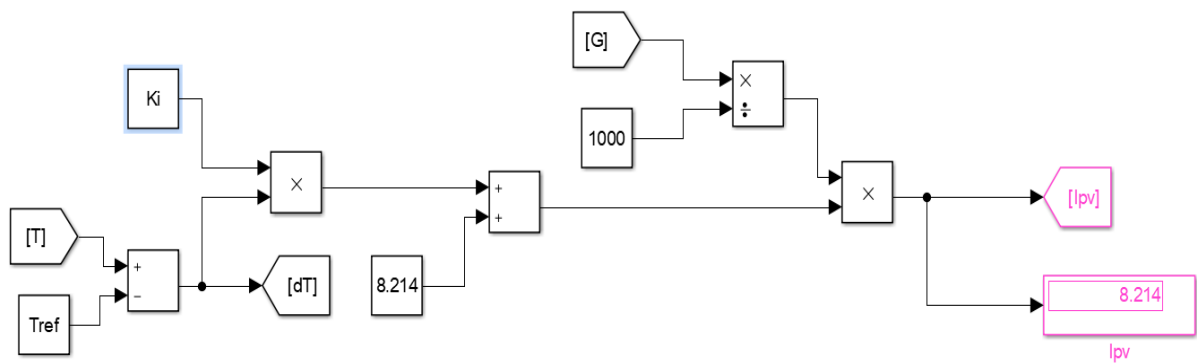


Fig.II. 15: Schéma bloc de calcul du courant photovoltaïque

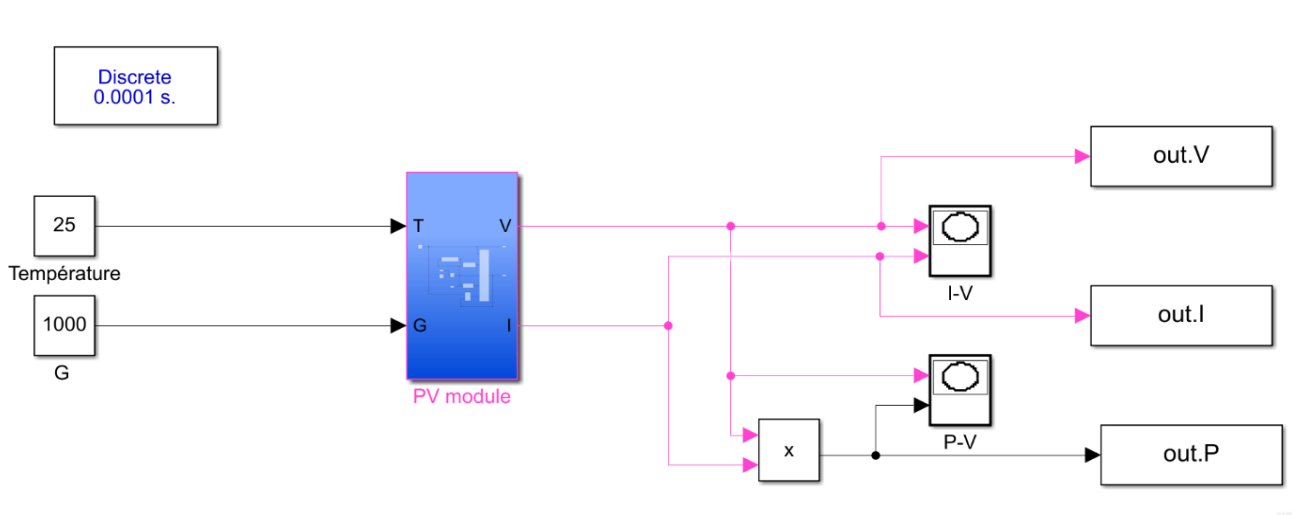


Fig.II. 16: Schéma du système complet sous Simulink

PARAMETRES DE SIMULATION :

La fiche technique du panneau KC200GT que nous avons choisi donne les spécifications suivantes :

**Table II 2: Caractéristiques électriques du module photovoltaïque du panneau KC200GT dans les conditions standards « CST » [4] :**

V <sub>pm</sub> (V)	I <sub>pm</sub> (A)	P <sub>max</sub> (W)	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>pv</sub> (A)	I <sub>sc</sub> (A)	I <sub>0</sub>	R <sub>s</sub>	R <sub>p</sub>
26.3	7.61	200	32.9	8.214	8.12	9.894.10 <sup>-8</sup>	0.221	15.405

### II.3. RESULTATS ET L'ANALYSE DE LA SIMULATION :

#### II-3-1 Les caractéristiques non linéaires I-V et P-V de la cellule solaire sous les conditions standards :

##### a- Caractéristique I-V :

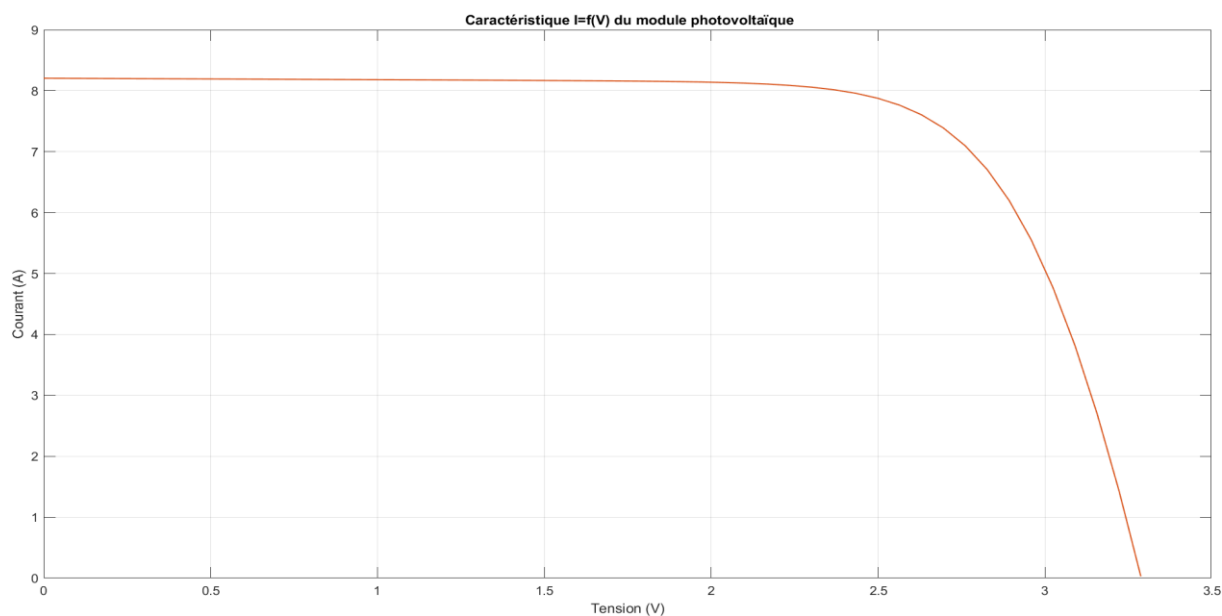


Fig.II. 17: Caractéristique I=f(V) du module photovoltaïque

Le courant reste constant quelle que soit la tension dans la première partie puis la partie intermédiaire représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé enfin Cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant  $I_{cc}$  (courant de court-circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en  $V_{co}$  (tension maximale de circuit ouvert).

##### a- Caractéristique P-V :

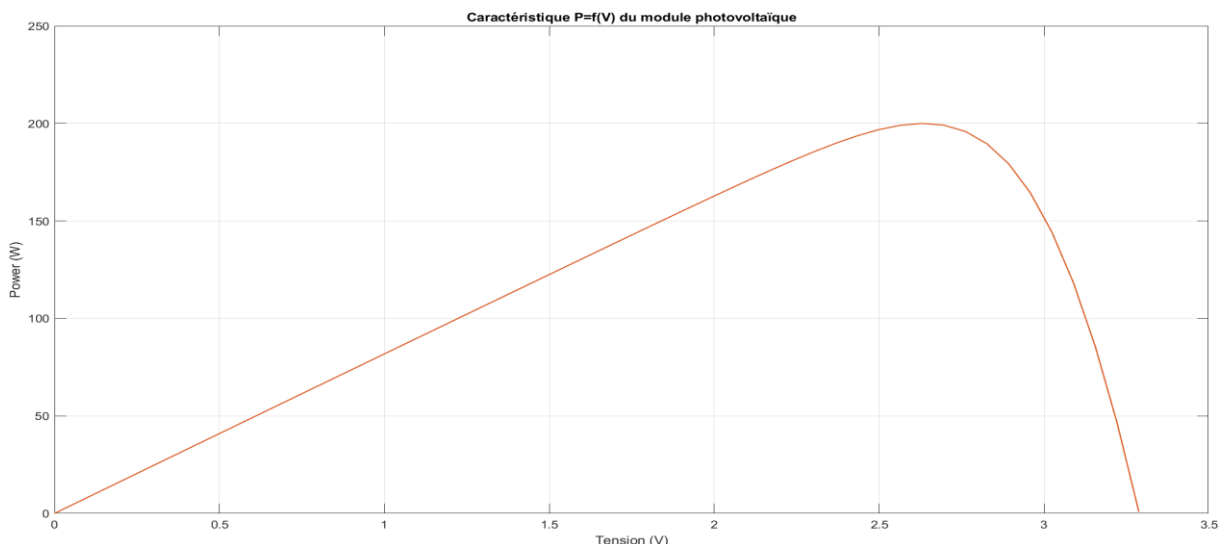


Fig.II. 18: Caractéristique P=f(V) du module photovoltaïque

On remarque que la puissance augmente linéairement jusqu'à la valeur maximale (200 W) puis diminue rapidement jusqu'à son annulation.

### II.3.2. L'Influence de la variation des conditions météorologiques sur les caractéristiques de PV :

#### a- L'influence de la température :

Pour voir l'influence de la température nous avons tracé les courbes I-V et P-V du champ PV pour une irradiation  $G= 1000 \text{ W/m}^2$  et des températures différentes. Elles sont présentées sur la Figure suivante

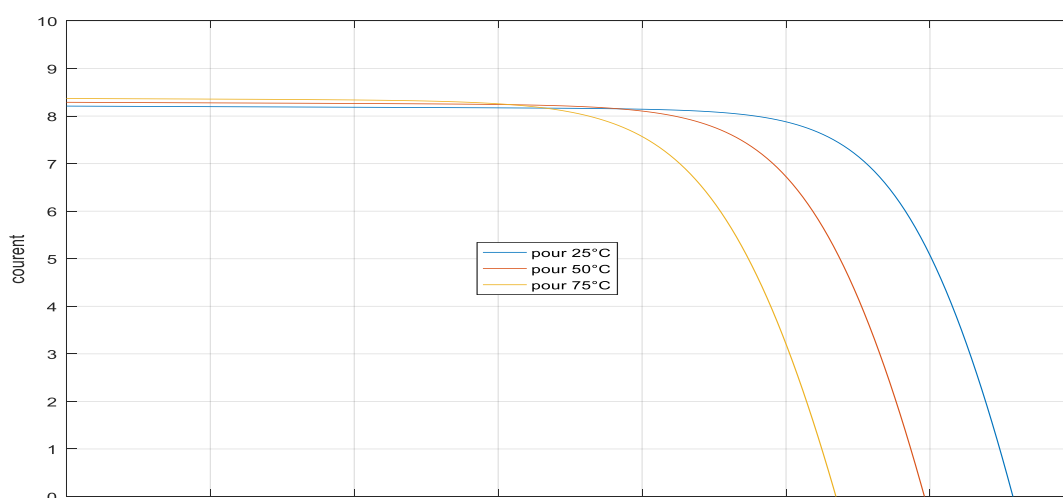


Fig.II. 19: Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de T

Pour la figure (II.19), nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit-ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (II.20).

On observe que lorsque  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $75^{\circ}\text{C}$ . les tensions maximales du champ PV sont respectivement 26.3 V, 23V, 20 V. La tension décroît lorsque la température augmente. Il en est de même pour la puissance maximale qui décroît avec la température.

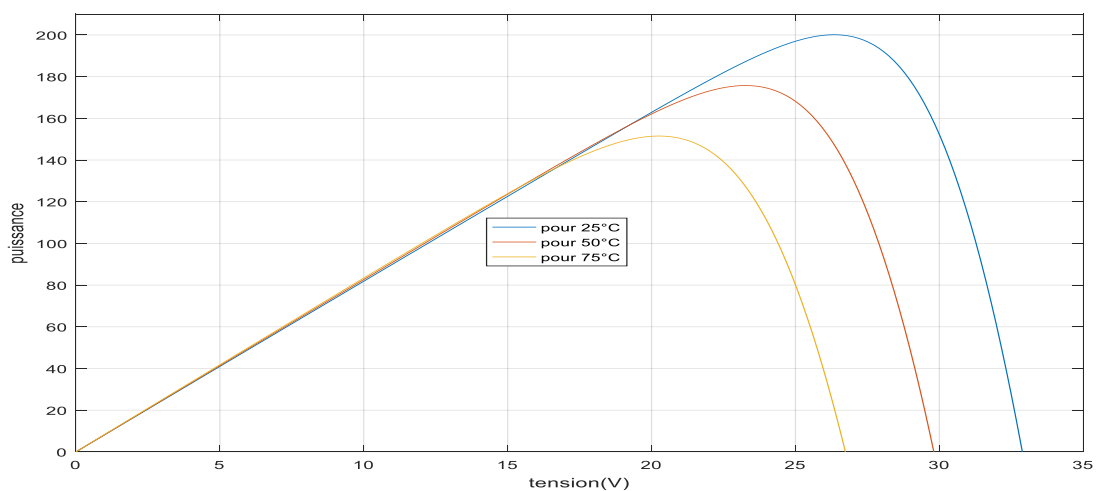


Fig.II. 20: Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de T

#### b- Influence de l'éclairement :

Les simulations faites permettent d'obtenir les courbes I-V et P-V du champ PV pour différents éclairements et températures. La Figure suivante illustre l'évolution du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs de l'irradiation à une température  $T = 25^{\circ}\text{C}$ .

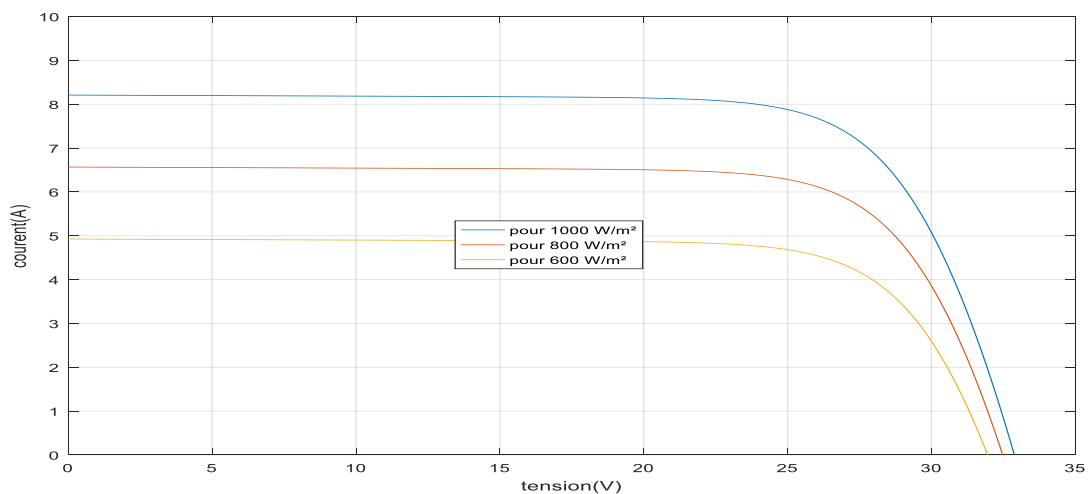


Fig.II. 21: Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de G

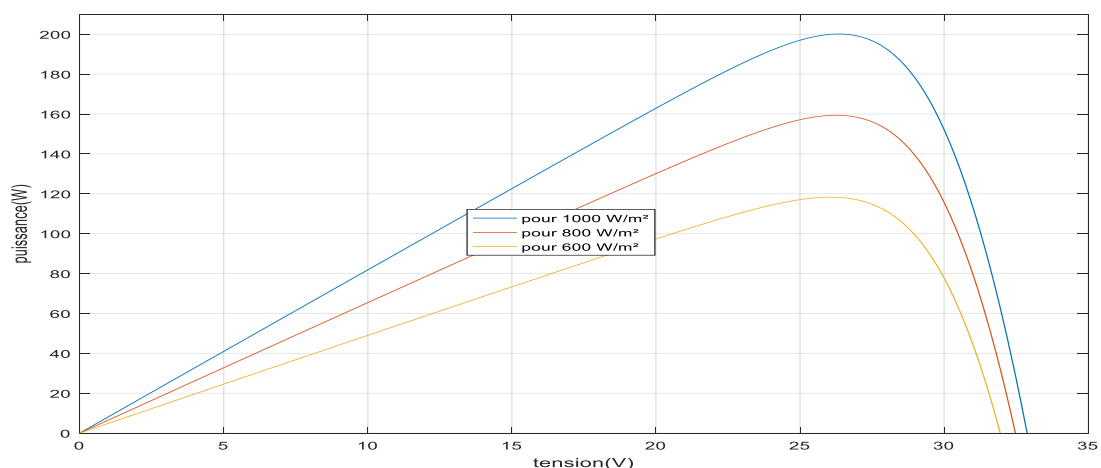


Fig.II. 22: Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de G

Le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement dans la partie gauche des caractéristiques, par contre la tension n'est pas très dégradée. La cellule peut fournir une tension correcte même à petit éclairage.

On observe que lorsque  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$ , les puissances maximales respectives du champ PV sont de 118.3 W, 159.4 W et 200.1 W. qui implique la valeur de puissance est proportionnelle avec l'éclairement et le point de puissance maximale se situe presque à la même tension.

#### II.4. Commande de système photovoltaïque :

Les générateurs photovoltaïques ne peuvent pas délivrer une puissance maximale. En effet, les variations climatiques qui influent sur la caractéristique  $I(V)$  entraînent la fluctuation de la puissance maximale. Pour cela il existe plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le MPP. Ces commandes sont connues sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking), associées à un hacheur DC\DC qui assure le couplage entre le générateur et la charge.

##### II.4.1. Modélisation du système photovoltaïque :

Le système étudié est constitué par le GPV, le convertisseur DC\DC et une charge résistive à la sortie du système.

Le convertisseur DC\DC est commandé par un signal à modulation de largeur impulsion (MLI ou PWM) avec une stratégie de recherche du point de puissance maximal MPPT.

La Figure ci-dessous présente le synoptique de l'ensemble du système : [5]

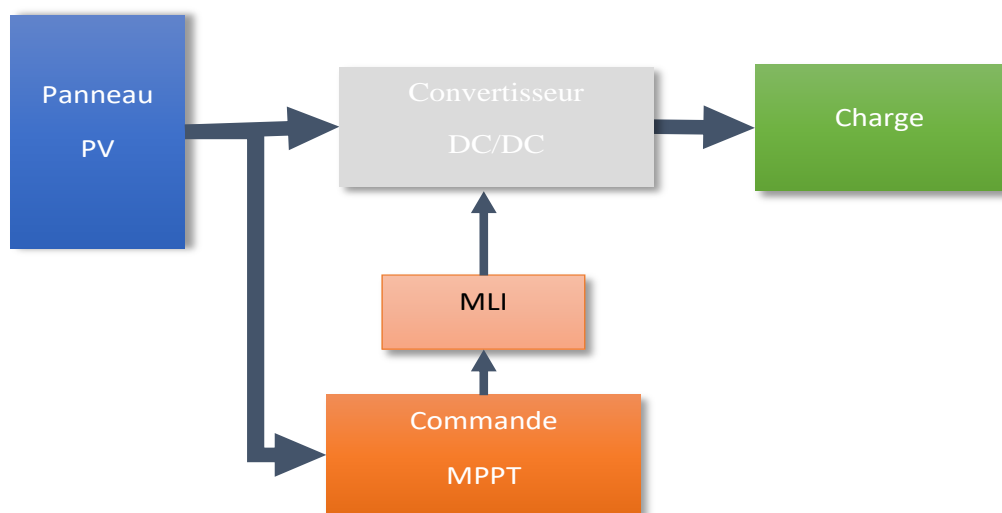


Fig.II. 23: Schéma d'un système photovoltaïque

L'étage de commande détermine le rapport cyclique (entre 0 et 1) sur lequel est basé le signal PWM, cette dernière attaque le convertisseur DC/DC pour ramener le panneau à fonctionner avec sa tension optimale, donc sa puissance maximale.

### II.4.1.1. Modélisation du convertisseur statique DC/DC :

Un hacheur est un convertisseur continu-continu qui permet de générer une source de tension continue variable à partir d'une autre source de tension continue.

Différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés selon la position du commutateur et de l'hacheur.

- Élévateur de tension « BOOST » ou hacheur survolteur.
- Abaisseur de tension « Buck » ou hacheur dévolteur.
- Abaisseur/Élévateur de tension « BUCK-BOOST ».

Dans ce travail on a choisi l'hacheur survolteur (BOOST).

a- Convertisseur BOOST :

Lorsqu'on souhaite augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser l'hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur. Ce dispositif de l'électronique de puissance est un convertisseur continu-continu mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne.

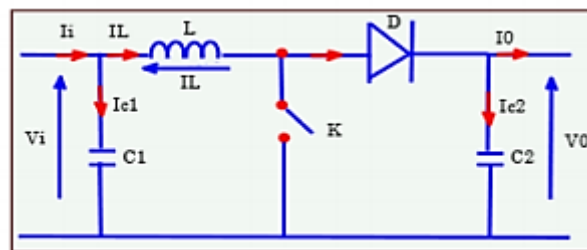


Fig.II. 24: Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Connaitre le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (II.26) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur survolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant  $d.T_s$ , et l'interrupteur ouvert pendant  $(1-d).T_s$ .

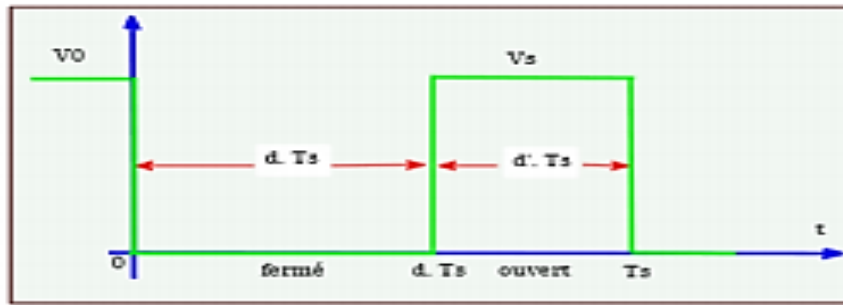


Fig.II. 25: Périodes fermeture et ouverture d’un commutateur

L’application des lois de Kirchoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement donne

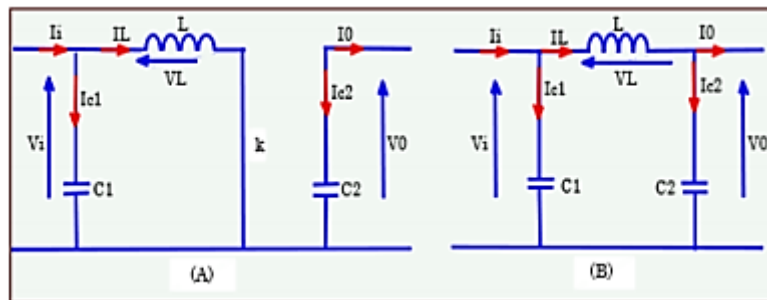


Fig.II. 26: Schémas équivalents de l’hacheur survolteur (A) : K fermé,(B) : ouvert pour la première période d.TS:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (II.26)$$

Pour la deuxième période  $(1-d).Ts$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (II.27)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période :  $Ts$ , on utilise généralement l’expression suivante :



$$\left(\frac{dx}{dt}\right)T_s = \frac{dx}{dt}dT_s + \frac{dx}{dt(1-d)T_s}(1-d)T_s \quad (\text{II.28})$$

En appliquant la relation (II.26) sur les systèmes d'équations (II.27) et (II.28), on obtient Les équations qui régissent le système sur une période entière on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_L - C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L}{dt} + (1-d)V_0 \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

La figure suivante illustre le modèle schématique sous Matlab/Simulink de l'étage d'adaptation Boost.

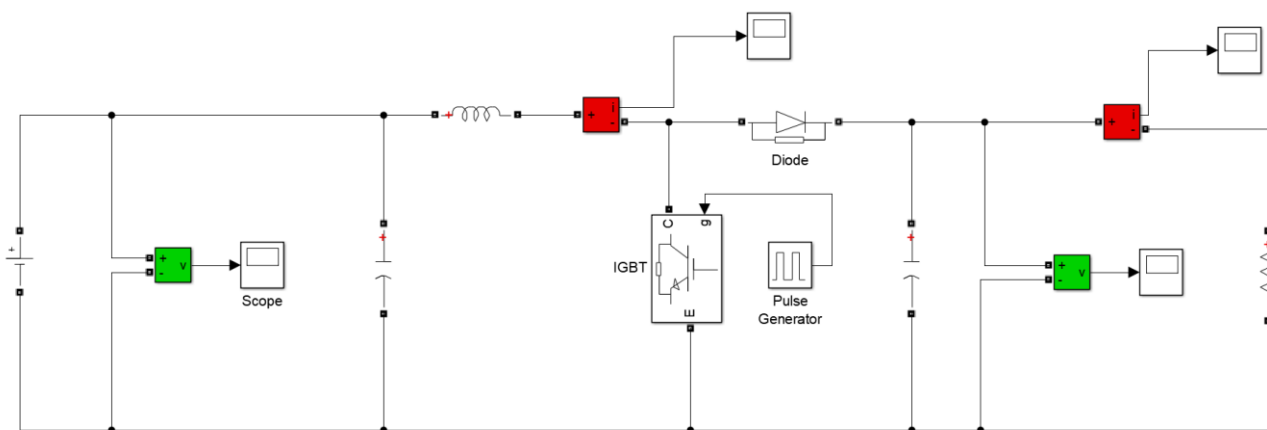


Fig.II. 27: Schéma de simulation d'un hacheur boost

#### II.4.1.2. La commande MPPT :

La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking', est une commande nécessaire pour un fonctionnement idéal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

##### II.4.1.2.1. Algorithme Perturber et observer 'P&O' :

L'algorithme PO consiste à modifier le point de fonctionnement du module PV, en augmentant ou diminuant le facteur de marche d'un convertisseur continu-continu, et mesurer la puissance de sortie

avant et après la perturbation. Si la puissance augmente, l'algorithme perturbe le système dans le même sens. Sinon, le système est perturbé dans la direction opposée. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV [6].

Les 4 options possibles présentées lors du suivi du MPP sont :

- Cas (A) :  $\Delta P < 0$  et  $\Delta V < 0$ .
- Cas (B) :  $\Delta P < 0$  et  $\Delta V > 0$ .
- Cas (C) :  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V > 0$ .
- Cas (D) :  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V < 0$ .

Dans les cas A et C, le rapport cyclique doit diminuer, entraînant une augmentation de la tension du module PV.

Alors que dans les cas B et D, le rapport cyclique doit être augmenté de façon à ce que la tension du module PV diminue.

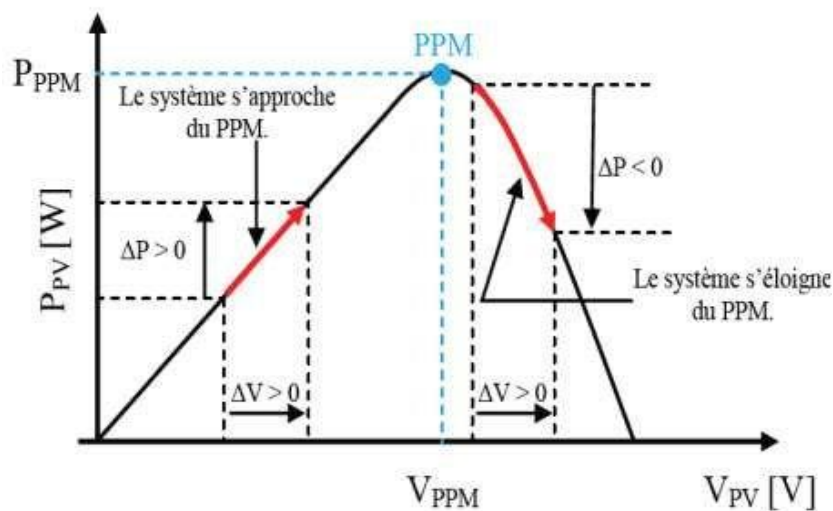


Fig.II. 28: le principe l'algorithme P&O.

L'organigramme mis en œuvre pour le contrôleur PO est présenté par la Figure suivante :

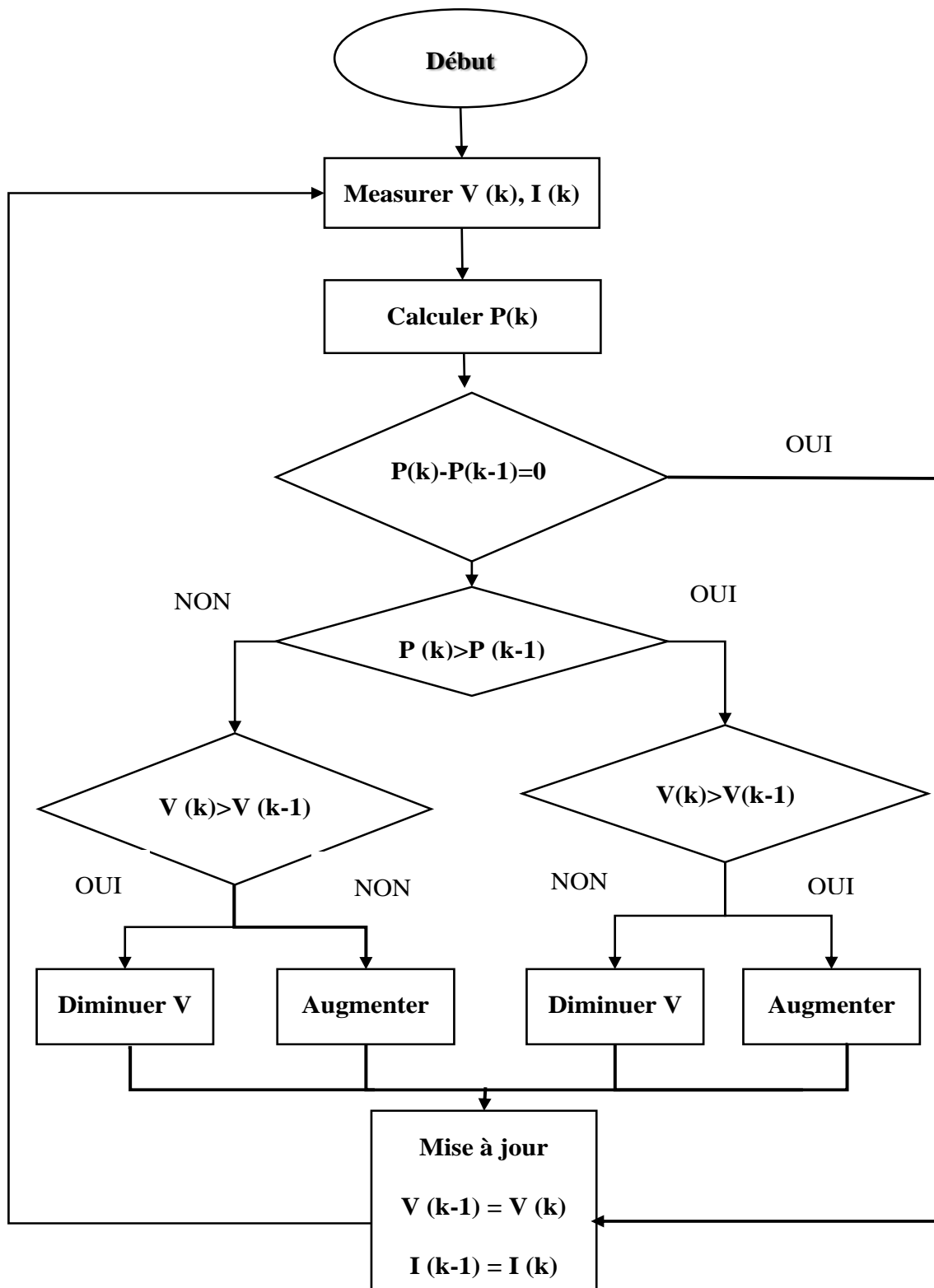


Fig.II. 29: Organigramme de la méthode P&O.

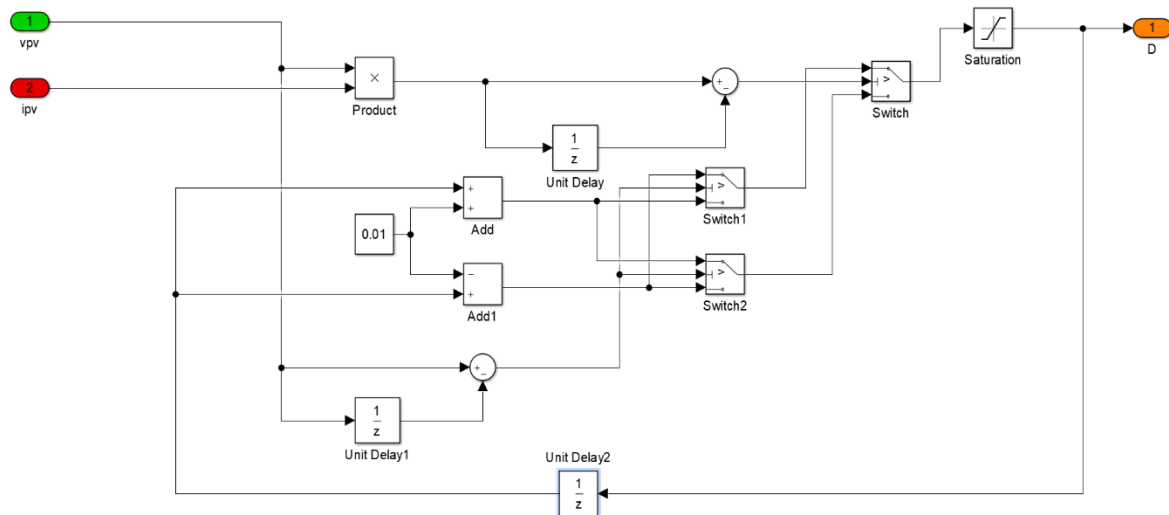


Fig.II. 30: schéma block de la technique PO

Comme le montre la figure II.30, les entrées du système MPPT sont les  $\Delta P$  et  $\Delta V$  calculées à partir des signaux  $P(k)$ ,  $P(k-1)$ ,  $V(k)$  et  $V(k-1)$ , les signes de ces deux entrées sont exploités pour savoir dans quelle position de la courbe P-V on se trouve.

#### II.4.1.2.1. La technique de Fuzzy Logique :

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, nous permettons à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux. La logique floue confère ainsi une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes.

Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel.

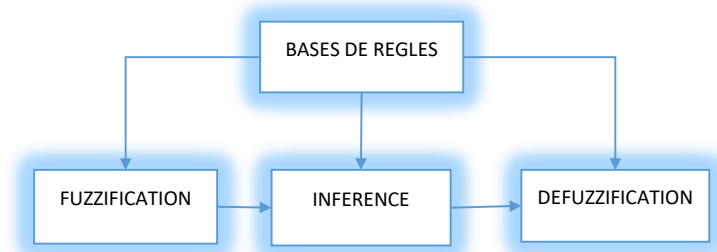


Fig.II. 31: Structure de base d'un contrôleur floue

En particulier, cette commande est mieux adaptée aux systèmes non linéaires. Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois blocs : la fuzzification, l’inférence et la défuzzification.

a- La Fuzzification :

La fuzzification permet la conversion des variables physiques d’entrée en ensembles flous. Dans notre cas, on a deux entrées, l’erreur E et la variation de l’erreur CE définies comme suit :

$$E = \frac{P(k) - P(k-1)}{I(k) - I(k-1)} \tag{II.30}$$

$$CE = E(k) - E(k-1) \tag{II.31}$$

Les variables linguistiques d’entrée et de sortie partitionné en plusieurs classes pour plus de précision ; Négatif Petit (NS), Négatif Grand (NB), Erreur nul ou bien Zéro (ZE), Positif Grand (PB), Positif Petit (PS).

La figure suivante montre l’interface d’accueil du fichier FIS

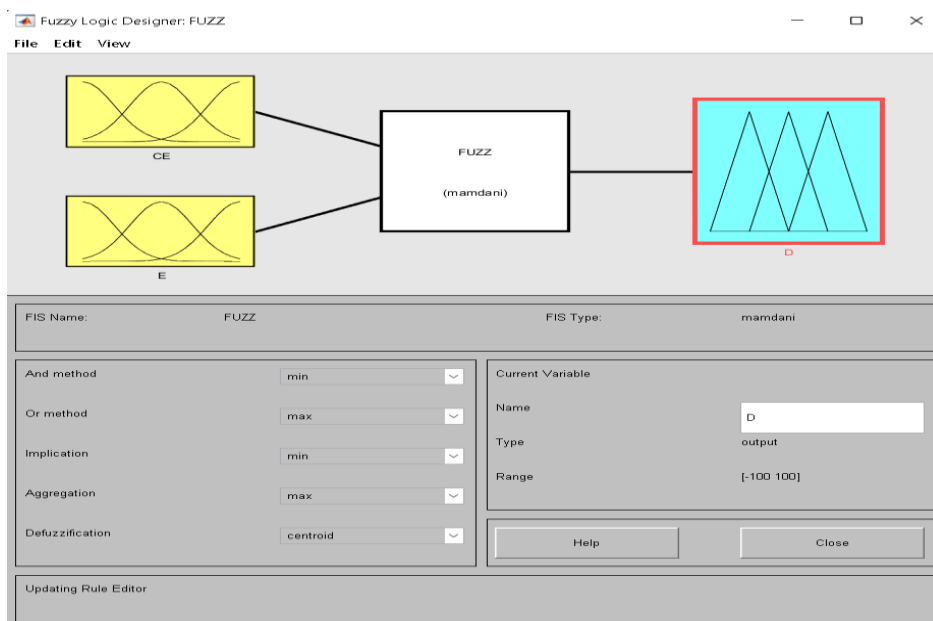


Fig.II. 32: l’interface d’accueil du fichier FIS

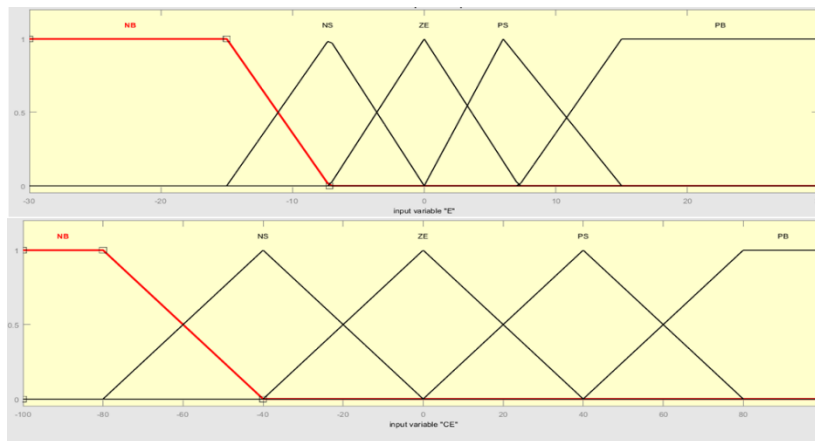


Fig.II. 34. Les variables linguistiques d’entrée

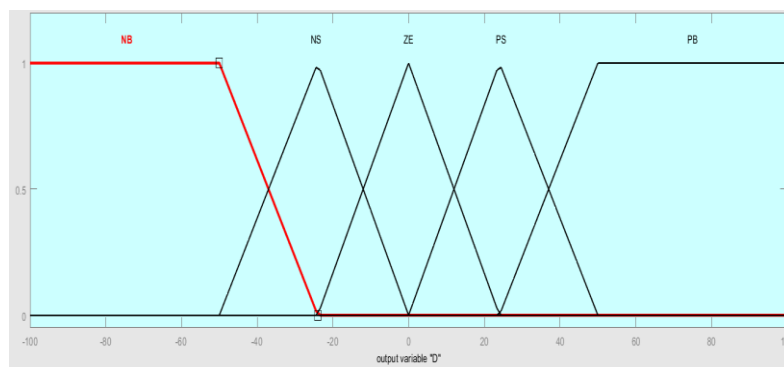


Fig.II. 33: Les variables linguistiques de sortie

Règles floues :

Le tableau suivant donne l’ensemble des règles qui permettant de déterminer le signal de sortie d’un régulateur MPPT a l’aide des deux signaux d’entrées (E et CE)

Table II 3: les règles floues :

CE/E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	PS	NS	NB
NS	ZE	ZE	ZE	NS	NB
ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
PS	PB	PS	PB	ZE	ZE
PB	PB	PS	NS	ZE	ZE

a. Défuzzification :

C’est une étape vers laquelle on attribue pour D des valeurs numériques. Il existe plusieurs méthodes de Défuzzification l’une de ces méthodes les plus utilisées est la méthode de centre de gravité. Son principe est l’extraction barycentrique de la commande, qui consiste à faire la moyenne des valeurs du référentiel pondérées par leurs degrés d’appartenance.

La figure suivante représente le schéma block Matlab/Simulink de l’algorithme à base de logique floue qu’on a réalisé et la deuxième figure représente les blocs internes de MPPT.

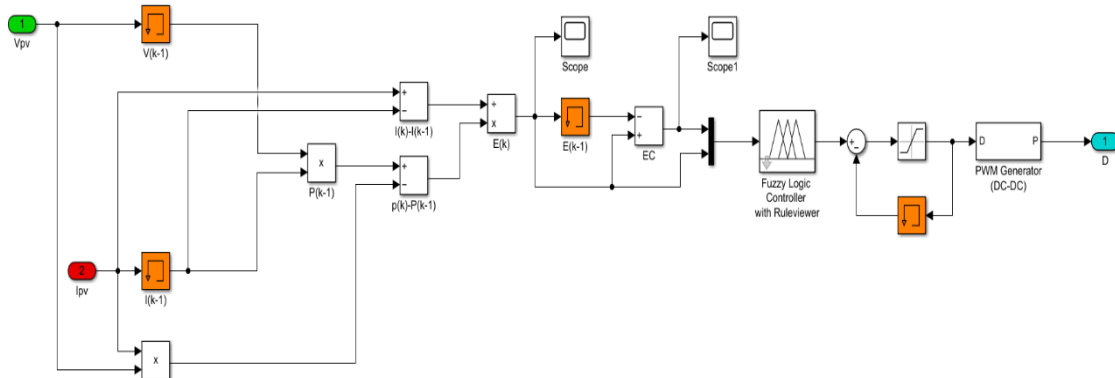


Fig.II. 35: Schéma bloc de l’algorithme à base de la logique floue

II-4-2- RESULTATS ET DISCUSSION :

a- Résultats de simulation :

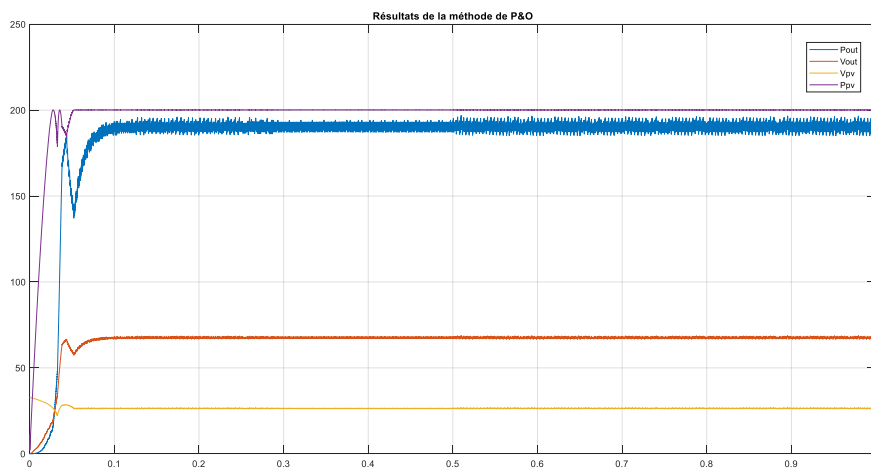


Fig.II. 36: Résultats de la méthode de P&O

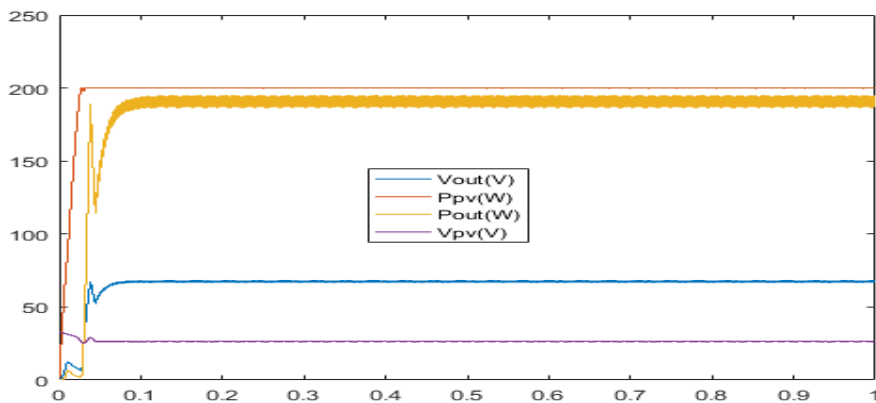


Fig.II. 37: Résultats la méthode de la logique floue

**Table II 4: la valeurs moyenne de la tension et la puissance de générateur photovoltaïque et la sortie du système photovoltaïque :**

	<b>Logique Flou</b>	<b>P&amp;O</b>
<b>D</b>	0.49	0.5
<b>Ppv</b>	200.1	200.1
<b>Vpv</b>	26.49	26.17
<b>Pout</b>	192.3	184.9
<b>Vout</b>	67.89	66.61

b- Discussion des résultats :

Les résultats de simulation du système photovoltaïque commandé par les différentes techniques de commande MPPT représentent par les figures (II.36) et (II.37). Ces figures expriment la tension et la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et les techniques accomplissent correctement leurs rôles. L'hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En général, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente des oscillations autour de la valeur optimale. L'inconvénient majeur de cet algorithme est son mauvais comportement suite à un changement inattendu de l'éclairement (nuages).

L'algorithme basé sur la logique floue est un algorithme robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. En outre, il est caractérisé par un bon comportement en état transitoire. Cependant, l'implémentation de ce type d'algorithme est plus complexe que les algorithmes classiques.



## II.5. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé mathématiquement le panneau solaire et le BOOST. Pour obtenir un modèle exploitable sur Simulink, les équations développées ont été réalisées dans des schémas blocs. Ensuite nous avons présentés différentes techniques pour la poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale où les techniques sont P&O et la logique floue.

Ensuite on a présenté les résultats obtenus par la méthode de commande de MPPT appliqué à un générateur PV. Le travail a été réalisé sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les résultats des simulations accentuent que l'algorithme 'P&O' donne des mêmes résultats avec la technique de la logique floue qui nous donne un bon comportement et des meilleures performances par rapport aux autres techniques.

# Chapitre III

## Systeme Hybride

### **III.1. Introduction :**

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu indispensable. Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt considérable par leur flexibilité, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir-faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer. Ces installations hybrides vont connaître, à moyen terme un intérêt certain grâce à leur flexibilité vis-à-vis des sources d'énergie primaire. Dans ce cadre, nous présenterons dans ce chapitre, la modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien.

### **III.2. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents :**

#### **III.2.1. Introduction :**

Un alternateur à aimants permanents est une génératrice électrique effectuant la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique. Il est par principe une machine synchrone à courant alternatif polyphasé et plus particulièrement une machine triphasée fournissant un système équilibré de tensions et de courants alternatifs, dans laquelle les champs magnétiques statoriques et rotorique sont en rotation synchrone, c'est-à-dire à la même vitesse. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques.

La machine synchrone à aimants permanents est largement utilisée dans plusieurs applications comme les machines à outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique, ...).

#### **III.2.2. Description de la machine :**

La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'un entraînement direct lors de la liaison mécanique entre le moyeu de l'éolienne et la génératrice, on parle donc d'alternateur. Il faut cependant que la génératrice soit raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Si la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome car elle n'a pas besoin d'excitation extérieure. Elle est composée de deux parties une partie tournante (inducteur), nommée rotor, et une partie fixe (induit), nommée stator.

Le stator est constitué de trois séries d'enroulements identiques réparties autour du stator décalées dans l'espace qui vont être le siège de courant électrique alternatif induit par la variation du flux du champ magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit.

Le circuit inducteur sert à produire le champ magnétique se nomme « circuit ». Le champ magnétique est créé de deux façons : par un électro-aimant ou encore par des aimants permanents.

En plus de ces deux circuits, les alternateurs de grande dimension ont des enroulements électriques en court-circuit, appelés "enroulements amortisseurs", afin d'amortir les oscillations de vitesse lors de perturbations. Ils ne portent un courant que lors d'une perturbation ; lorsque les trois courants des trois phases sont débalancés. Les alternateurs utilisés pour les petites éoliennes n'ont pas de tels enroulements amortisseurs.

### III.2.3. Modèle de la machine synchrone à aimants permanents :

Le stator alimenté par un système de tensions triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ magnétique tourne à la vitesse ( $f/p$ ) de tours par secondes.

Avec :  $f$  : fréquence d'alimentation des bobinages statoriques, et  $p$  : le nombre de paires de pôles.

Le rotor composé de  $p$  aimants permanents va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne ainsi à la même vitesse que celle du champ tournant. La vitesse de rotation du rotor est donc :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad \text{III.1}$$

Le modèle analytique de la machine synchrone à aimants permanents peut être déduit en adoptant un ensemble d'hypothèses simplificatrices données dans la majorité des références [11] [12] :

- La répartition du champ inducteur dans l'entrefer ainsi que les forces magnétomotrices sont sinusoïdales ;
- Le circuit magnétique est considéré linéaire (absence de saturation),
- L'effet d'amortissement au rotor est négligé,
- Les irrégularités de l'entrefer dues aux encoches statoriques sont ignorées,
- Les phénomènes d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Le rotor est supposé lisse du point de vue magnétique (MSAP sans pièces polaires) ;
- Les enroulements du stator sont par construction tous décalés d'un angle de «120° » les uns par rapport aux autres ;
- L'aimant est idéal, le flux magnétique émis par les aimants est constant ;
- On néglige l'influence de la température sur les résistances des enroulements ;
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

**III.2.4. Équations de la machine synchrone dans le repère abc :**

Les équations de tensions des phases statoriques servent au point de départ pour l'élaboration du modèle dynamique de la machine synchrone à aimants permanents.

La MSAP triphasée est constituée au stator d'un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) décalés, l'un par rapport à l'autre, d'un angle de 120° (Figure. II.16), et au rotor des aimants permanents assurant son excitation.

L'avantage des machines synchrones à aimants permanents est l'absence de bobinage au rotor et, par conséquent, l'absence de contacts glissants et de pertes joules au rotor. Cependant, l'inconvénient majeur réside dans le fait qu'on perd toute possibilité de réguler le courant inducteur. Ceci rend très difficile de faire fonctionner la machine en survitesse. On doit alors imposer des courants statoriques qui affaiblissent le flux rotorique [11].

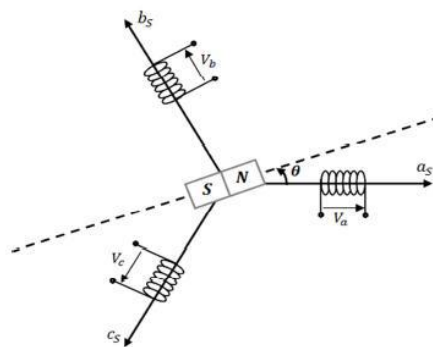


Fig.III. 1: Représentation du repère abc.

Afin d'élaboration le modèle électrique de la machine, on modélise le circuit des enroulements de phases illustrés dans la (Figure. II.17). Sur cette figure, les tensions de phase,  $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$  et  $V_{sc}$  et les courants instantanés  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  circulant dans ces phases ainsi que les FEM induites sont illustrés.

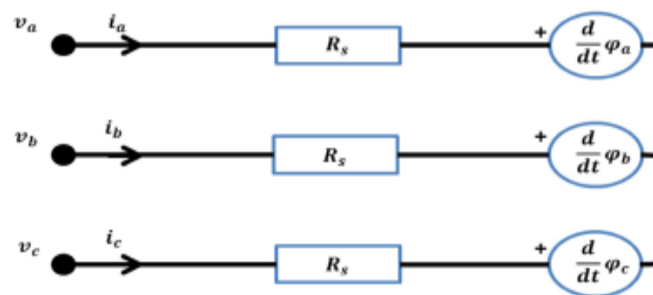


Fig.III. 2: Structure du circuit des enroulements d'une MSAP.

Les tensions s'expriment en fonction des courants et des flux par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{III.2}$$

Avec :

$R_s$  : La résistance des phases statoriques.

$[V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}]^T$  : Les tensions des phases statoriques.

$[i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T$  : Les courants des phases statoriques.

$[\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}]^T$  : Les flux totaux à travers les bobines statoriques.

Dans ces équations,  $\Phi_{abc}$  correspond au flux magnétique total induit à travers chacun des bobinages. Le flux total dans chaque phase peut être exprimé comme suit

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = \Phi_f \begin{bmatrix} \cos(p\theta) \\ \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(p\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{III.3}$$

$\Phi_f$ : Représente la valeur crête du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statiques.

Comme les enroulements statoriques sont montés en étoile à neutre isolé, la somme instantanée des courants statoriques est nulle, de sorte qu'il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

### III.2.5. Modèle de la machine synchrone dans le repère de PARK :

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Ce passage mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor, l'axe « d » se situe sur le même axe que celui de l'aimant permanent (Figure. III.3).

Les deux bobines sur les axes (d, q) tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q) nous permettent d'avoir ainsi un modèle simple de la machine [11].

La transformation de Park n'est qu'une rotation de la transformation de Clark (conservation des amplitudes) ou bien de Concordia (conservation des puissances ou Park modifiée) définie par la matrice «  $[P(\theta_p)]$  » reliant les grandeurs des deux domaines « abc » et « dq » par l'équation :

$$[V_{sdq}] = [p(\theta)]. [V_{sabc}] \quad \text{III.4}$$

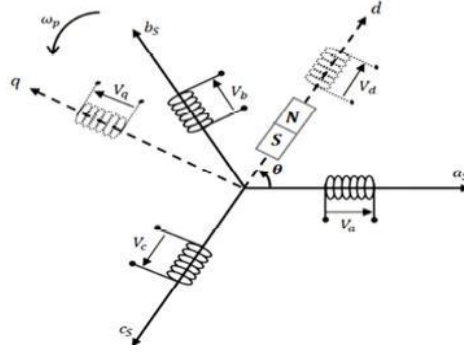


Fig.III. 3: Représentation de la MSAP dans le repère de Park.

$$[I_{sdq}] = [p(\theta)]. [I_{sabc}]$$

$P(\theta)$  : est la matrice de PARK. Elle est donnée par :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{III.5}$$

Pour passer des équations dans le plan de Park aux équations dans le plan (a,b,c), on utilise la transformation de Park inverse qui est donnée par :

$$p(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{III.6}$$

Les équations électriques dans le plan « dq » s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - p\Omega_{mec} L_q i_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + p\Omega_{mec} L_d i_{sd} + \sqrt{\frac{2}{3}} \Phi_f p\Omega_{mec} \end{cases} \quad \text{III.7}$$

Avec :  $V_{sd}$   $V_{sq}$  : Tensions statoriques (directe et en quadrature).

$I_{sd}$ ,  $I_{sq}$  : Courants statoriques (direct et en quadrature).

Les tensions étant les grandeurs d'entrée, on peut exprimer les grandeurs de sortie (les courants) en fonction de celles-ci. On obtient alors :

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_d} (-R_s i_{sd} + V_{sd} + p\Omega_{mec} L_q i_{sq}) \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_q} (-R_s i_{sq} + V_{sq} - p\Omega_{mec} L_d i_{sd} + \sqrt{\frac{2}{3}} \Phi_f p\Omega_{mec}) \end{cases} \quad \text{III.8}$$

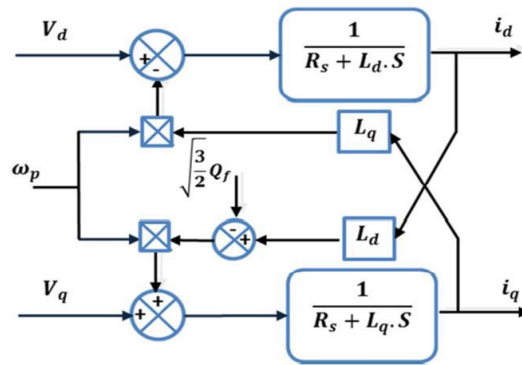


Fig.III. 4: Modèle de la MSAP.

**III.2.6. Equation du couple électromagnétique :**

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor :

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = p \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} \tag{III.9}$$

$W_e$ : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$\theta_{geo}$  : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

$P$  : nombre de pair de pôle.

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par :

$$P_t = \frac{3}{2} (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \tag{III.10}$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimée par :

$$C_{em} = (p\Phi_f i_{sq} + p(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) \tag{III.11}$$

**III.2.7. Equation mécanique :**

La dynamique de la machine est régie par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_r - C_{em} - f\Omega_{mec} \tag{III.12}$$

Avec :

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique,  $C_r$  : Le couple résistant.

$\Omega_{mec}$  : La vitesse de rotation.

$f$  : Le coefficient de frottement visqueux



$J$  : L'inertie des parties tournantes.

Le modèle complet de la GSAP est décrit par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - p\Omega_{mec} L_q i_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + p\Omega_{mec} L_d i_{sd} + \sqrt{\frac{2}{3}} \Phi_f p\Omega_{mec} \\ C_{em} = (p\Phi_f i_{sq} + p(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) \\ C_{em} = C_r + f\Omega_{mec} - J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \end{array} \right. \quad \text{III.13}$$

### III.3. Architecture à bus DC :

En général, Les systèmes de petite puissance présente une structure ou le bus CC est le point central de connexion. Les petites éoliennes produisent de l'électricité en courant alternatif et fréquence variable puis injectée dans le bus CC (au travers d'un convertisseur si nécessaire). Cette énergie est ensuite stockée ou reconvertie en courant alternatif (à amplitude et fréquence fixes) à travers un onduleur pour alimenter la charge. L'onduleur est dimensionné pour alimenter des pics de charge.

La puissance délivrée peut être contrôlée en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable. Les avantages et les inconvénients d'un tel système sont présentés ci-après.

#### Avantages :

- La connexion de toutes les sources sur un bus CC simplifie le système de commande.
- Les générateurs peuvent être dimensionnées de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75 à 85%.

#### Inconvénients :

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.

- Les générateurs ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

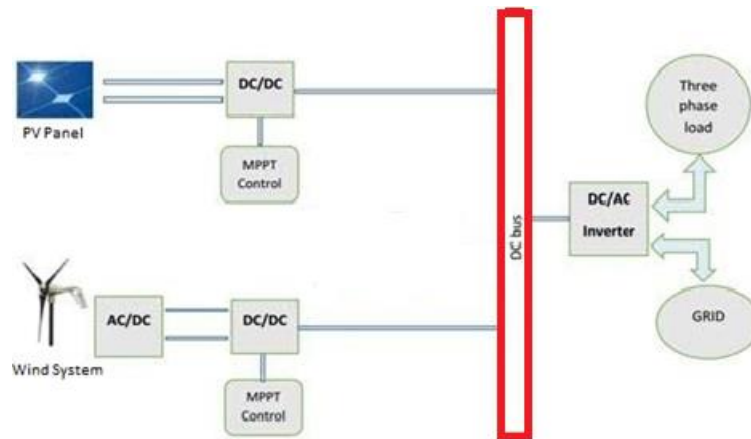


Fig.III. 5: Configuration d'un système hybride à bus DC.

### III .4. Convertisseurs :

#### III.4.1. Les convertisseurs DC-AC (onduleurs) :

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est-à-dire que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée.

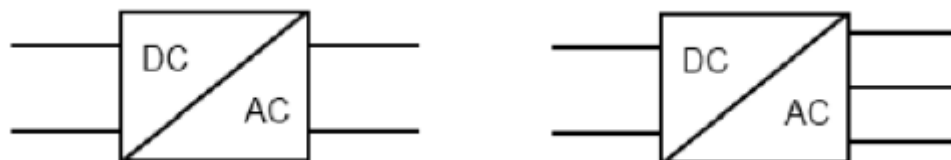


Fig.III. 6: Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.

#### III.4.1.1. Structure d'onduleur :

La chaîne de conversion d'énergie éolienne est généralement connectée à un réseau électrique, afin de lui injecter l'énergie électrique exploitée. L'injection de cette énergie est assistée par un onduleur de tension triphasé, qui assure la phase d'injection de l'énergie par les deux tâches suivantes :

- Maintenir la tension du bus continu constante en contrôlant la puissance transitée vers le réseau via l'onduleur de tension.

- Commander les interrupteurs statiques afin d’injecter la puissance de référence (puissance électromagnétique en retranchant celle du condensateur) au réseau.
- Un onduleur est un convertisseur qui permet de convertir un signal d’entrée continu en un signal de sortie alternatif, il est doté de la même structure que le redresseur à MLI.

Simulation :

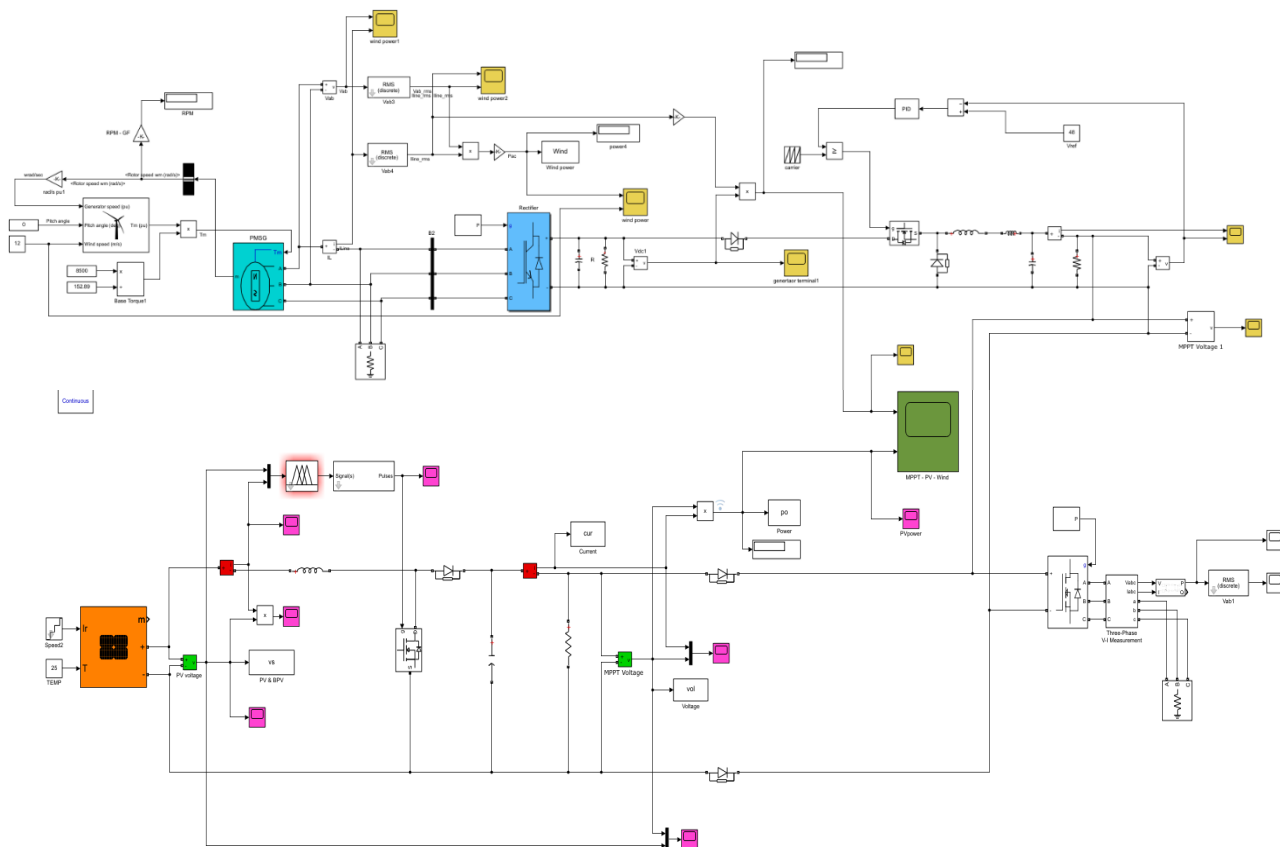


Fig.III. 7: Schéma bloc du système hybride relié avec charge

**Interprétation de simulation**

En appliquant un profil de vent et d’ensoleillement illustré dans le chapitre II, l’objectif est de vérifier le fonctionnement de poursuite du point de maximum de puissance. D’après les résultats obtenus, on remarque que :

- ♣ L’allure de tension générée par le panneau en utilisant la MPPT flou est à l’image de sa référence.
- ♣ Les puissances générées des deux systèmes sont de valeur de 480watt pour l’éolienne, et 56 watts pour le PV.

♣ La tension du bus continu présentée par la Figure (V.12),  $V_{dc}$  est assurée à sa consigne de 48V. ce qui montre la stabilité électrique du système.

♣ La puissance de la charge est de 200watt.

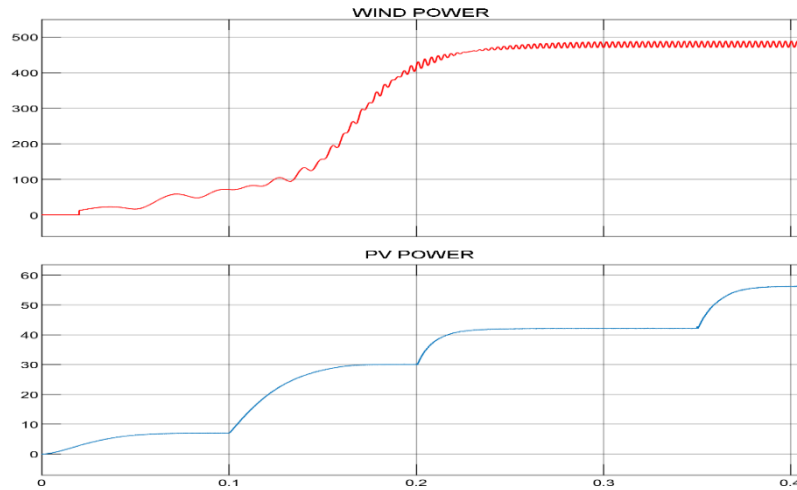


Fig.III. 8: Résultat de la puissance de pv et éolien

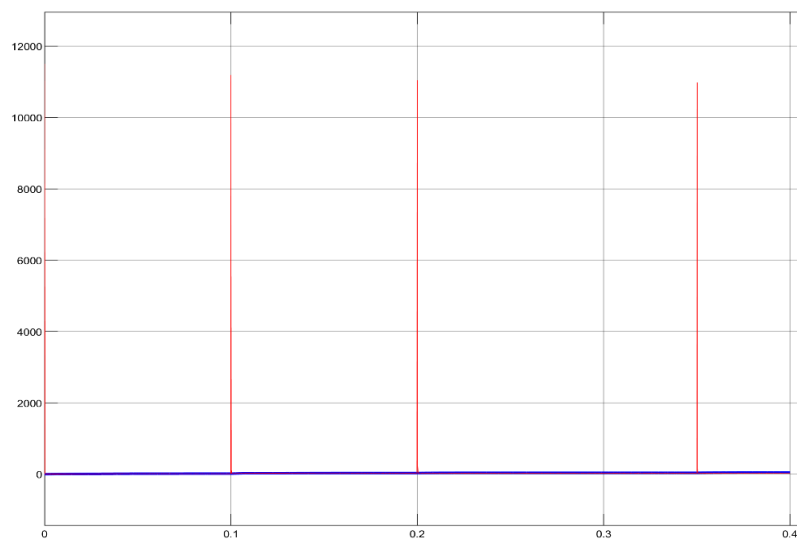


Fig.III. 9: Résultat de MPPT et le voltage du PV

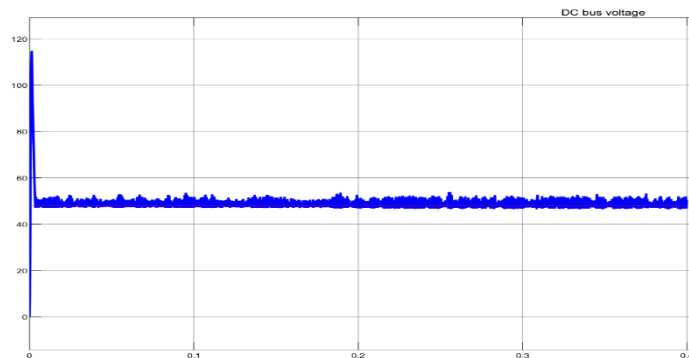


Fig.III. 10: Tension de bus à courant continue

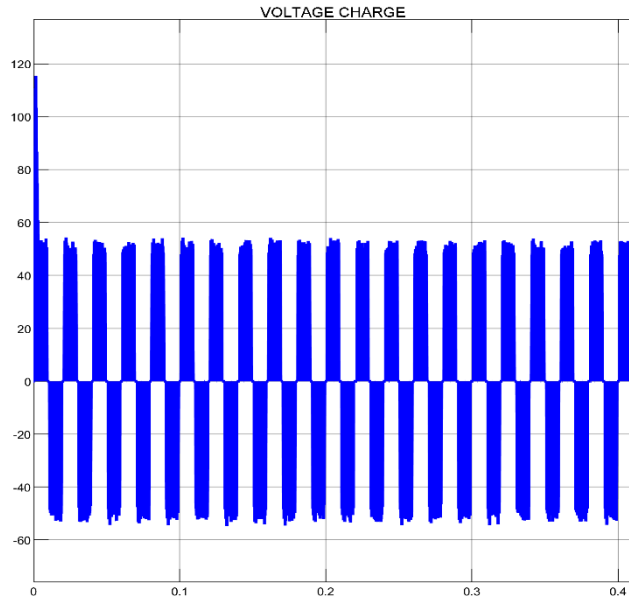


Fig.III. 8: Résultat de la tension de la charge

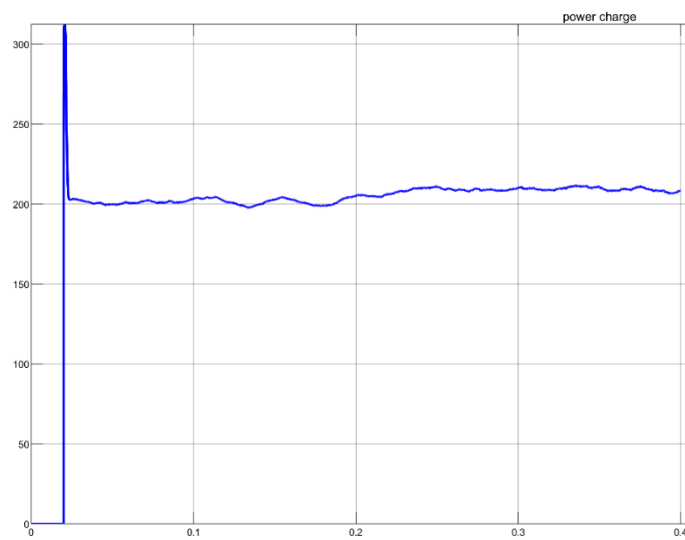


Fig.III. 12: Résultat de la puissance de la charge

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

---

L'objectif principal de ce travail est l'exploitation d'une énergie renouvelable hybride qui connecte deux sources d'énergie (éolienne et photovoltaïque) qui exige son adaptation au réseau auquel elle doit être connectée. A cet effet, une méthodologie d'analyse basée sur la prise en compte des perturbations climatique a été entreprise et ce concernant ces deux sources d'énergie.

Afin d'exploiter ce type d'énergie, il est impératif de modéliser et de commander les différentes parties de ce système. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie renouvelable, la modélisation, l'analyse de fonctionnement et la commande.

A travers l'étude du système de conversion d'énergie éolienne présenté dans le premier chapitre, nous a permis de réaliser une modélisation complète et globale. Cette modélisation est basée principalement sur l'approche qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs aérodynamiques pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de l'hélice. Tout cela a été conçu autour d'une GSAP.

La modélisation du panneau photovoltaïque a été abordé dans le deuxième chapitre, ce qui nous a permis d'élaborer un modèle Simulink dans le but de vérifier les équations établis.

L'objectif principal de notre travail consiste d'un coté à l'extraction du maximum de puissance appelée "MPPT" avec régulateur PI pour la turbine, l'optimisation par l'algorithme « Perturber et Observer) (P&O) pour le panneau photovoltaïque. Pour améliorer cette extraction afin d'avoir un meilleur rendement, une nouvelle stratégie de commande avancée (Logique Floue) est appliquée et des essais de simulation sont effectués et commentés.

Les résultats de simulations ont donné des performances dynamiques très satisfaisantes avec un bon suivi.

L'adaptation au réseau nécessite de recourir à l'électronique de puissance par l'intermédiaire de convertisseurs statiques. La modélisation des deux convertisseurs, leur principe de fonctionnement et la technique de commande MLI., ainsi que la modélisation du bus continu, ont été traité en dernier. Les résultats de simulation de la chaine complète réalisés en utilisant l'outil MATLAB, montrent la faisabilité de connecter un système à vitesse variable à un réseau stable, et confirment l'efficacité de la stratégie choisie à savoir le mode synergétique, ainsi que son bon suivi face aux fluctuations du vent.

En perspective, beaucoup de points peuvent être envisagés tels que :

- L'implémentation de ces algorithmes dans un banc d'essai pratique.
- L'association du système éolien au réseau.

## Annexe

### Paramètre de simulation

#### a- Eolienne :

$$P=4.8e2 \text{ w}$$

$$\text{Coefficient de puissance}=0.48$$

$$\text{Lambda}=8.1$$

$$\text{Speed nom}=1$$

$$\text{Wind base}=12$$

#### b- Paramètre Photovoltaïque :

$$\text{Température} = 25^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Irradiation} = 1000 \text{ w/m}^2$$

$$\text{Maximum Power} = 60.8 \text{ W}$$

$$\text{Voc} = 48 \text{ V}$$

$$\text{Isc} = 1.8 \text{ A}$$

$$\text{Vmp} = 47.5 \text{ V}$$

$$\text{Imp} = 1.28 \text{ A}$$

#### c- Paramètres charge :

$$\text{Tension} = 50\text{v}$$

$$\text{Puissance} = 200\text{w}$$

#### d- Paramètre bus continu :

$$\text{Vdc} = 48 \text{ V}$$

$$\text{C} = 470e-4$$



## Références bibliographiques

---

- [1]. S.M. Muyeen, J. Tamura, T. Murata. « Stability augmentation of a grid connected wind farm ». Springer, 2009.
- [2]. I. Munteau, A. I. Bratcu, N.A Cutululis, E. Ceanga. « Optimal control of wind energy systems ». Springer, 2008.
- [3]. Dr. Gary L. Johnson, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001
- [4]. M. Messaoud, « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent ». Thèse de Magistère de l'université de Batna. 2008
- [5]. P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.
- [6]. Dr. Gary L. Johnson, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001
- [7]. N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2005.
- [8]. B. Boukhezzar. « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable ». Thèse de doctorat, université paris XI, France 2006.
- [9]. S. Gassab, « Modélisation d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne » mémoire de magister de l'Université Ferhat Abbas – Sétif, décembre 2011
- [10]. S. Hassaine, « Application des nouvelles techniques de commande de la machine synchrone à aimants permanents » thèse de doctorat de l'université des sciences et de technologie d'Oran,
- [11]. F.D. Bianchi, H. De Battista, R.J. Mantz. « Wind turbine control systems, principles, Modelling and Gain Scheduling Design ». Springer, 2007.
- [12]. I. Munteanu, A. I. Bratcu, N.A Cutululis, E. Ceangă. « Optimal control of wind energy systems ». Springer, 2008.
- [13]. B. Boukhezzar. « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable ». Thèse de doctorat, université paris XI, France 2006.

## Références bibliographiques

---

- [14]. H. Camblong. « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France 2003
- [15]. N Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2005.
- [16]. A.Labouret, M.Villoz, « Energie Solaire Photovoltaïque », Edition Dunod, Paris, 2006.
- [17]. F. Lasnier, T.G. Angel, « Photovoltaic Engineering Handbook », Iop Publishing Ltd. 1980. Isbn 0-85274-311-4.
- [18] Dr. Belaid Ialouni Sofia, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », Université A.Mira de bejaia De Doctorat En Électrotechnique, Ecole Normale Supérieure De Cachan, 2002.
- [19]. Olivier Gergaud, « Modélisation Énergétique Et Optimisation Économique D'un Système De Production Éolien Et Photovoltaïque Couplé Au Réseau Et Associé À Un Accumulateur », Thèse De Doctorat En Électrotechnique, Ecole Normale Supérieure De Cachan, 2002.
- [20]. H.Belghitri «Modélisation, Simulation Et Optimisation D'un Système Hybride Eolien – Photovoltaïque », Thèse De Magister Université De Tlemcen2010.
- [21]. C. Zidani, F. Benyarou Et B. Benyoucef, « Simulations De La Position Apparente Du Soleil Et Estimation Des Energies Solaires Incidents Sur Un Capteur Plan Photovoltaïque Pour La Ville De Tlemcen (Algérie) », Revue Energies Renouvelables, Vol.6, Pp.69-76, 2003.
- [22] A.Nouar « Etude et modélisation des différent modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales», Mémoire de Magister, Université Sétif 2010
- [23]. S.Petibon, « Nouvelles Architectures Distribuées De Gestion Et De Conversion De L'énergie Pour Les Applications Photovoltaïques », Thèse De Doctorat, Université De Toulouse, 2009.
- [24]. C.P.De Brichaumbot Et C.Vauge, « Le Gisement Solaire », Edition Tech. & Doc, Paris, 1982.
- [25] : S.Lalouni, D. Rekioua, T. Rekioua, and E. Matagne, "Fuzzy logic control of stand-alone photovoltaic system with battery storage", Journal of Power Sources, Volume 193, Issue2, 5 September 2009, pp. 899-907.

## Références bibliographiques

---

[26] : M. G. VILLALVA, J. R. GAZOLI, E. RUPPERT "MODELING AND CIRCUIT-BASED SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC ARRAYS «. UNIVERSITY OF CAMPINAS - UNICAMP

[27] : MAHOUZ HAYET, "ETUDE D'UNE CHAÎNE PHOTOVOLTAÏQUE ", MEMOIRE DE MASTER OPTION COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUE, UNIVERSITE IBN KHALDOUN DETIARET.2016

[28] : BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative.", Université Ferhat Abbes-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique, 2007.

[29] : Abbes, H., Abid, H., Loukil, K., Toumi, A., & Abid, M. (2014). " Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque". Revue des Energies Renouvelables, 17(3), 435-445.

[30]. P.Barred , "Energy Storage And Applications With Super Capacitors", Laboratoire Electrotechnique Industrielle Leisti-Ise, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne Epflch 1015 Switzerland.

[31]. A. TAMAARAT « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA ». Thèse, Doctorat en sciences en Electrotechnique Université Mohamed KHIDER, BISKRA, Algérie 2015.

[32]. R. Andoulsi "étude d'une classe de systèmes photovoltaïques par une approche bond graph modélisation, analyse et commande ", Thèse de doctorat université des sciences et technologies de Lille 2001.

[33]. BELAIYAD. ABDELMOUMEN « Modélisation des panneaux photovoltaïque par les méthodes de soft computing » Mémoire de Magister université de Bejaia 2018.

[34]. Wildi Théodore, Sybille Gilbert, " électrotechnique", de boeck, 4e édition, 2005.

[35] H. Camblong, 'Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, Décembre 2003.

[36] M. Malinowski, 'Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers', PhD Thesis, Warsaw University of Technology, Institute of Control and Industrial Electronics, 2001.

[37] M. Malinowski and M.P. Kazmierkowski, 'Simulation Study of Virtual Flux Direct for Three-Phase PWM Rectifiers', 26th Annual Conference of the IEEE ; Industrial Electronics Society, INCON, Vol. 4, pp. 2620 – 2625, 2000.

## Références bibliographiques

---

- [38] Hind Djeghloud, 'Filtrage Actif de Puissance', Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2007.
- [39] S. Belakehal, 'Conception et Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables', Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2010.
- [40] O.S. Thongam, M. Ouhrouche, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power (Rupp Carriveau, 2011, pp. 339-360).
- [41] C. Nan, W.Chang Lin, X. Khoa Le, "Modelling of a PMSG Wind Turbine with Autonomous Control", Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2014, pp. 1-9, May 2014.
- [42] M. Messaoud, « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent ». Thèse de Magistère de l'université de Batna. 2008
- [43] A. Mirecki « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de L'institut national polytechnique de Toulouse le 5 avril 2005.
- [44] S. Morimoto, H. Nakayama, M. Sanada, Y. Takeda, « Sensorless Output Maximization Control for Variable-Speed Wind Generation System Using IPMSG », 0-7803-7883- 0/03/ 2003 IEEE.
- [45] A. Bouscayrol, Ph. Delarue, X. Guillaud, « Power strategies for maximum control structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine », Renewable Energy 30 (2005) 2273–2288.
- [46] A. B. Raju, K. Chatterjee, B. G. Fernandes, « A Simple Maximum Power Point Tracker for Grid connected Variable Speed Wind Energy Conversion System with Reduced Switch Count Power Converters », 0-7803-7754-0/03/2003 IEEE.