

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras  
Faculté des Sciences et de la Technologie



# Mémoire de Magister

Spécialité : Electrotechnique

Option : Commande des Machines Electriques

Thème :

## Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables

Présenté par

**FEDDAOUI Omar**

**Devant le jury composé de :**

|              |               |            |                          |
|--------------|---------------|------------|--------------------------|
| Président :  | Khaled Khelil | MCA        | Université de Souk Ahras |
| Rapporteur   | Riad Toufouti | MCA        | Université de Souk Ahras |
| Examineurs : | Salah Saad    | Professeur | Université d'Annaba      |
|              | Hocine Labar  | Professeur | Université d'Annaba      |

## **Résumé :**-----

Les préoccupations croissantes sur l'environnement après le Protocole de Kyoto ont encouragé l'exploitation des ressources renouvelables propres et inépuisables. La production de l'énergie par des ressources renouvelables est principalement mise en œuvre pour alimenter les zones rurales éloignées. Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement. Cependant, et pour pallier ces problèmes les travaux de recherche ont été orientés vers le concept des systèmes hybrides de génération d'énergie électrique.

L'objectif principal de ce travail est l'étude et la simulation d'un système hybride éolien-diesel qui répond à nos besoins énergétiques afin de réduire les émissions des gaz à effet de serre.

Les résultats de simulation obtenus, par Matlab/Simulink, montrent la souplesse du système proposé face aux variations de la charge tout en minimisant les émissions des gaz à effet de serre et assurant une meilleure stabilité sur la tension et la fréquence générées en présence des perturbations provoquées par la ressource aléatoire du vent.

## **Abstract :**-----

Growing concerns about the environment after the Kyoto Protocol led to the use of clean and inexhaustible renewable resources. The production of energy from renewable resources is mainly implemented to supply remote rural areas. For these regions, the grid extension prices would be prohibitive and the additional cost of the fuel supply increases dramatically with isolation. To overcome these problems the research has been directed towards the concept of hybrid systems generation of electrical energy.

The main objective of this work is the study and simulation of a Wind –Diesel system that meets our energy needs to reduce greenhouse gas emissions. The simulation results obtained by Matlab/Simulink show the proper functioning of the proposed system in the presence of network disturbances and wind generation because of cuts wind well justified by the greater stability of the voltage and frequency generated by a self-excited induction generator.

## -----ملخص

أدت المخاوف المتزايدة حول البيئة بعد بروتوكول كيوتو الى تشجيع استخدام الطاقات الجديدة و النظيفة. و تستعمل هذه الطاقات الجديدة لتغذية المناطق الريفية و النائية التي يبقى مشكل توصيلها بالطاقة الكهربائية متعلقا بالسعر الباهض و التكلفة الإضافية للوقود التي تزداد بشكل كبير مع عزلة هذه المناطق . للتغلب على هذه المشاكدراسات و بحوث متعددة قد تم توجيهها الى فهم الأنظمة الهجينة لتوليد الطاقة الكهربائية .

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة لمحاكاة نظام هجين لمحرك ديزل مع توربينات الرياح الذي يلبي احتياجنا للطاقة الكهربائية و ذلك للحد من الانبعاثات الغازية .

نتائج الدراسة المتحصل عليها من خلال برنامج ماتلاب تثبت مرونة النظام المقترح مع الطلب المتغير للطاقة و ذلك للتقليل من الانبعاثات الغازية و توفير استقرار أكبر في التردد مع وجود اضطرابات ناجمة عن سرعات رياح عشوائية .

# *Dédicaces*

*A ma famille, mes parents*

*Mes frères et sœurs et leurs enfants*

*A la famille FEDDAOUI et NAMOUNE*

*A mes amis*

# *Remerciements*

*Le travail présenté dans ce mémoire a été mené au département de génie électrique faculté des sciences et de la technologie de l'Université Mohamed Chérif Messaadia. Souk Ahras*

*Mes premiers remerciements vont à Messieurs **R.Toufouti** Maître de conférences à la même université. Je le remercie vivement pour leur présence tout au long de l'année. Leur compétence scientifique, leur disponibilité et leur sympathie en font d'un encadrement. Leur conseil et leur encouragement.*

*Je tiens également à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail de mémoire : Monsieur **K. Khelil**, Maître de conférence à l'Université de Souk Ahras, d'avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury de soutenance de ce mémoire. Messieurs **H.LABAR** Professeur à l'Université d'Annaba, et **S. SAAD** Professeur à l'Université d'Annaba pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les rapporteurs de ce mémoire.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement **Madame S.Meziane**, Maître de conférences à l'université de Souk Ahras, pour leur travail de corrige même dans les occupations maternelle, merci de tous mon cœur.*

*Je remercie aussi tous mes enseignants de la formation de l'ingénieur et de magistère.*

*Je tiens également à présenter ma plus vive sympathie aux collègues : **Abadlia Issam, Nakar Jamal, Benwarath Issam, Maazi Karim, Daboub Raouf, Ayach Khadija, Atarsia Loubna.***

**SYMBOLES :**

|            |  |
|------------|--|
| $C$        | Capacité d'un condensateur [ $F$ ].                                  |
| $C_y$      | La cylindrée totale du moteur.                                       |
| $C_r$      | Le couple résistant.   |
| $C_p$      | Coefficient aérodynamique de puissance d'une turbine éolienne.       |
| $e_g$      | F.é.m. à vide pour la machine synchrone.                             |
| $f$        | Fréquence du système [ $Hz$ ].                                       |
| $g$        | Le glissement de la machine.   |
| $G^*$      | Irradiation de référence $1kW / m^2$ .                               |
| $I$        | Le courant électrique [ $A$ ].                                       |
| $I_{cc}$   | Le courant de court-circuit [ $A$ ].                                 |
| $I_D$      | Le courant dans la diode parallèle [ $A$ ].                          |
| $I_L$      | Le photo-courant du module [ $A$ ].                                  |
| $I_m$      | Courant magnétisant de la machine [ $A$ ].                           |
| $I_R$      | Le courant dans la résistance parallèle [ $A$ ].                     |
| $I_{pm}$   | Courant pour la puissance maximale extraite [ $I$ ].                 |
| $J_{ds}$   | L'Inertie totale pour le moteur diesel.                              |
| $k$        | Le coefficient de Kapp.  |
| $K$        | Constante de Boltzmann [ $1,38.10^{-23} J / K$ ].                    |
| $K_a$      | Le gain statique.  |
| $K_1$      | Facteur intégrateur pour le contrôle de vitesse du moteur.           |
| $L_f$      | Inductances des fuites totales [ $H$ ].                              |
| $L_g$      | Inductance synchrone [ $H$ ].  |
| $L_r$      | Inductances cycliques rotorique [ $H$ ].                             |
| $L_s$      | Inductances cycliques statorique [ $H$ ].                            |
| $M$        | Inductances magnétiques.   |
| $m$        | Masse d'air.   |
| $m_f$      | Le débit de carburant injecté dans la chambre de combustion.         |
| $N$        | Nombre de conducteurs d'une phase de la machine.                     |
| $n$        | Facteur d'idéalité de la diode.                                      |
| $n_c$      | Le nombre de cylindres pour un moteur diesel.                        |
| $n_i$      | Le rendement pour un moteur diesel.                                  |
| $P_{diss}$ | Perte en puissance pour le moteur diesel [ $W$ ].                    |
| $P_i$      | Puissance fournie par le moteur diesel [ $W$ ].                      |
| $P_{in}$   | Puissance incidente lumineuse [ $W$ ].                               |
| $P_m$      | Puissance maximum extraite [ $W$ ].                                  |
| $P_n$      | Puissance nominale générée par l'éolienne [ $W$ ].                   |
| $p_{mf}$   | La pression moyenne des pertes par frottement pour le moteur diesel. |

|                      |  |
|----------------------|--|
| $P_{mg}$             | Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice [ W ].    |
| $P_{mt}$             | Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé [ W ]. |
| $R$                  | Rayon de la voilure [ m ].   |
| $R_r$                | Résistance d'une phase rotorique [ $\Omega$ ].                         |
| $R_s$                | Résistance d'une phase statorique [ $\Omega$ ].                        |
| $R_p$                | Résistance parallèle [ $\Omega$ ].                                     |
| $R_{sr}$             | Résistance série [ $\Omega$ ].   |
| $S$                  | Surface active de la voilure [ $m^2$ ].                                |
| $T$                  | Température de module [ K ].   |
| $T_d$                | Le couple mécanique sur l'arbre de moteur diesel.                      |
| $T_{em}$             | Le couple électromagnétique.   |
| $T^*$                | Température ambiante égale a $25^0 C$ .                                |
| $U$                  | Tension au borne de l'enroulement de la machine [ m / s ].             |
| $V$                  | Vitesse du vent [ m / s ].   |
| $V_{c0}$             | Tension de court-circuit [ V ].  |
| $V_{pm}$             | Tension pour la puissance maximale extraite [ V ].                     |
| $\omega_s$           | Pulsation des grandeurs statorique [ rad / s ].                        |
| $\Omega$             | Vitesse de rotation [ rad / s ].                                       |
| $\Omega_1, \Omega_2$ | Vitesse de rotation de l'éolienne avant et après le multiplicateur.    |
| $\lambda$            | Vitesse relative de l'éolienne.  |
| $\rho$               | Masse volumique d'air [ $kg/m^3$ ].                                    |
| $\delta_d$           | Le statisme qui aide à contrôler la vitesse du moteur.                 |
| $\tau$               | Constante du temps [ S ].  |
| $\phi$               | Le flux statorique [ weber ].  |
| $\alpha_1$           | $A/C^0$ Coefficient obtenu empiriquement.                              |
| $\eta$               | Le rendement de puissance.   |
| $\sigma$             | La conductivité d'un matériau [ $w.m^{-1}.k^{-1}$ ].                   |

**ABREVIATIONS :**

|      |                                      |
|------|--------------------------------------|
| GD   | Générateur diesel                    |
| GPV  | Générateur photovoltaïque.           |
| MAS  | Machine asynchrone                   |
| MPPT | Maximum de puissance.                |
| SH   | Système hybride d'énergie électrique |

# **SOMMAIRE**

|  |    |
|--|----|
| <b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....   | 1  |
| <br>   |    |
| <b>CHAPITRE 1:GENERALITES ETETAT DE L'ART DES SYSTEMES HYBRIDES DE GENERATION D'ENERGIE ELECTRIQUE</b> |    |
| <b>1.1 INTRODUCTION</b> .....  | 3  |
| <b>1.2 LES ENERGIES RENOUVELABLES</b> .....  | 3  |
| 1.2.1 La croissance de l'exploitation des énergies renouvelables .....                                 | 3  |
| 1.2.2 Production de l'électricité par les énergies renouvelables .....                                 | 4  |
| 1.2.2.1 <i>L'hydraulique</i> .....   | 4  |
| 1.2.2.2 <i>Le solaire</i> .....  | 5  |
| 1.2.2.3 <i>L'éolienne</i> .....  | 6  |
| 1.2.2.4 <i>La biomasse</i> .....   | 6  |
| 1.2.2.5 <i>La géothermie</i> .....   | 7  |
| 1.2.2.6 <i>Les énergies marines</i> .....  | 7  |
| 1.2.2.7 <i>L'hydrogène</i> .....   | 8  |
| <b>1.3 PRESENTATION DE SYSTEME HYBRIDE</b> .....   | 8  |
| 1.3.1 Etat de l'art sur le système hybride de génération d'énergie.....                                | 8  |
| 1.3.2 Les principaux composants d'un système SH .....  | 9  |
| 1.3.2.1 <i>Le générateur éolien</i> .....  | 10 |
| 1.3.2.2 <i>Le générateur photovoltaïque</i> .....  | 11 |
| 1.3.2.3 <i>Générateur diesel</i> .....   | 12 |
| 1.3.2.4 <i>Batteries de stockage</i> .....   | 13 |
| 1.3.2.5 <i>Système de supervision</i> .....  | 13 |
| 1.3.2.6 <i>Les convertisseurs</i> .....  | 14 |
| 1.3.2.7 <i>Les charges</i> .....   | 14 |
| <b>1.4 STRUCTURE DES SYSTEMES HYBRIDES</b> .....   | 14 |
| 1.4.1 Système hybride à base d'énergies renouvelables primaire seulement.....                          | 15 |
| 1.4.2 Système hybride à base d'une ou plusieurs énergies renouvelables avec unité de secours .....     | 15 |
| 1.4.3 Système hybride à base d'énergie renouvelable avec un système de stockage.....                   | 16 |
| <b>1.5 CLASSIFICATION DES SYSTEMES HYBRIDES</b> .....  | 16 |
| <b>1.6 PROBLEMES RENCONTRES DANS LE FONCTIONNEMENT DES SH.</b>   | 17 |
| <b>1.7 CONCLUSION</b> .....  | 19 |
| <br>   |    |
| <b>CHAPITRE 2:MODELISATION ET SIMULATION DU GROUPE DIESEL</b>  |    |
| <b>2.1 INTRODUCTION</b> .....  | 20 |
| <b>2.2 LE GROUPE DIESEL</b> .....  | 21 |
| 2.2.1 Groupe diesel fonctionnant à vitesse fixe .....  | 21 |
| 2.2.2 Groupe diesel fonctionnant à vitesse variable .....  | 21 |
| <b>2.3 DIMENSIONNEMENT DU GROUPE DIESEL</b> .....  | 22 |
| <b>2.4 CONSTITUTION DU GROUPE DIESEL</b> .....   | 22 |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 2.4.1   | Le moteur diesel .....  | 23 |
| 2.4.1.1   | <i>Définition</i> .....   | 23 |
| 2.4.1.2   | <i>Modèle simplifié du moteur diesel</i> .....                              | 24 |
| 2.4.2   | La machine synchrone a aimant permanent .....                               | 25 |
| 2.4.2.1   | <i>Le stator</i> .....  | 25 |
| 2.4.2.2   | <i>Le rotor</i> .....   | 26 |
| 2.4.2.3   | <i>Modèle simplifié de la MSAP</i> .....                                    | 26 |
| <b>2.5</b>  | <b>MODELISATION DU GROUPE ELECTROGENE DIESEL</b> .....                      | 28 |
| 2.5.1   | Modélisation du moteur diesel .....   | 28 |
| 2.5.2   | Modélisation de la machine synchrone à aimants permanent .....              | 29 |
| <b>2.6</b>  | <b>CONTROLE DE TENSION ET DE FREQUENCE POUR LE GD</b> .....                 | 29 |
| <b>2.7</b>  | <b>SIMULATION DU GROUPE ELECTROGENE</b> .....                               | 32 |
| <b>2.8</b>  | <b>CONCLUSION</b> .....   | 34 |
| <br>  |   |    |
| <b>CHAPITRE 3: MODELISATION D'UNE CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE AVEC MACHINA ASYNCHRONE AUTO EXCITE</b> |   |    |
| <b>3.1</b>  | <b>INTRODUCTION</b> .....   | 35 |
| <b>3.2</b>  | <b>AVANTAGES ET INCONVENANTS DE L'ENERGIE EOLIENNE</b> .....                | 36 |
| 3.2.1   | Avantage .....  | 36 |
| 3.2.2   | Inconvénients .....   | 36 |
| <b>3.3</b>  | <b>GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS</b> .....                           | 37 |
| 3.3.1   | Classement d'éolienne selon l'orientation de leur axe de rotation .....     | 37 |
| 3.3.1.1   | <i>Eoliennes à axe vertical</i> .....                                       | 37 |
| 3.3.1.2   | <i>Eoliennes à axe horizontal</i> .....                                     | 38 |
| 3.3.2   | Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation .....               | 38 |
| 3.3.3   | Etat de l'art sur le système éolien .....                                   | 39 |
| <b>3.4</b>  | <b>LES PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN SYSTEME EOLIEN</b> .....                  | 39 |
| 3.4.1   | La turbine .....  | 39 |
| 3.4.2   | Le système électromécanique .....   | 40 |
| 3.4.3   | Le système d'interconnexion .....   | 40 |
| 3.4.4   | Le système de contrôle .....  | 40 |
| <b>3.5</b>  | <b>GENERATEURS</b> .....  | 41 |
| 3.5.1   | La génératrice synchrone .....  | 41 |
| 3.5.2   | La génératrice asynchrone .....   | 42 |
| 3.5.3   | La génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) .....                | 42 |
| 3.5.4   | Une comparaison entre les différentes machines .....                        | 43 |
| <b>3.6</b>  | <b>MODELISATION DE LA CHAINE EOLIENNE</b> .....                             | 44 |
| 3.6.1   | Modèle du vent .....  | 45 |
| 3.6.2   | Choix de la machine génératrice pour une installation autonome .....        | 46 |
| 3.6.3   | Modélisation de la turbine .....  | 46 |
| 3.6.3.1   | <i>Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine</i> ..... | 46 |
| 3.6.3.2   | <i>Modèle de turbine</i> .....  | 46 |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 3.6.4      | Modèle de la génératrice asynchrone .....  | 50        |
| 3.6.5      | Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage .....   | 50        |
| <b>3.7</b> | <b>SIMULATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE ENTRAINEE<br/>PAR LA TURBINE CONNECTER A UNE CHARGE</b> ..... | <b>52</b> |
| 3.7.1      | Simulation de la vitesse du vent avec la turbine .....   | 52        |
| 3.7.1.1    | <i>Vitesse du vent théorique</i> .....   | 53        |
| 3.7.1.2    | <i>Vitesse du vent réel</i> .....  | 53        |
| 3.7.2      | Simulation de turbine avec la MAS .....  | 54        |
| <b>3.8</b> | <b>CONCLUSION</b> .....  | <b>56</b> |

## CHAPITRE 4:MODELISATION DES PANNEAUX SOLAIRES

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>4.1</b> | <b>INTRODUCTION</b> .....   | <b>57</b> |
| <b>4.2</b> | <b>L'ENERGIE SOLAIRE</b> .....                                      | <b>57</b> |
| 4.2.1      | L'énergie solaire en Algérie .....                                  | 57        |
| 4.2.2      | Le rayonnement solaire .....  | 58        |
| <b>4.3</b> | <b>LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE</b> .....                           | <b>58</b> |
| 4.3.1      | La cellule photovoltaïque .....                                     | 58        |
| 4.3.1.1    | <i>Principe de fonctionnement</i> .....                             | 58        |
| 4.3.1.2    | <i>Type des cellules photovoltaïques</i> .....                      | 59        |
| 4.3.1.3    | <i>Les semi-conducteurs</i> .....                                   | 60        |
| 4.3.2      | Les panneaux solaires.....  | 61        |
| 4.3.3      | L'adaptation entre la charge et la source .....                     | 64        |
| <b>4.4</b> | <b>AVANATAGES ET INCONVENANTS DES PV</b> .....                      | <b>65</b> |
| 4.4.1      | Avantage.....   | 65        |
| 4.4.2      | Inconvenants.....   | 65        |
| <b>4.5</b> | <b>MODELISATION DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE</b> .....                 | <b>66</b> |
| 4.5.1      | Modèle simplifié du panneau photovoltaïque .....                    | 66        |
| 4.5.2      | Caractéristiques du module photovoltaïque .....                     | 68        |
| 4.5.3      | Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque .....              | 69        |
| 4.5.3.1    | <i>Courant de court-circuit</i> .....                               | 69        |
| 4.5.3.2    | <i>Tension de circuit ouvert</i> .....                              | 69        |
| 4.5.3.3    | <i>Facteur de forme</i> .....                                       | 70        |
| 4.5.3.4    | <i>Le rendement</i> .....   | 70        |
| 4.5.4      | Influence des paramètres externes sur la caractéristique I (V)..... | 70        |
| 4.5.4.1    | <i>Influence des résistances série et shunt</i> .....               | 71        |
| 4.5.4.2    | <i>Influence de l'éclairement</i> .....                             | 72        |
| 4.5.4.3    | <i>Influence de la température</i> .....                            | 72        |
| <b>4.6</b> | <b>CONCLUSION</b> .....   | <b>74</b> |

## CHAPITRE 5:APPLICATION ET SIMULATION D'UN SYSTEME HYBRIDE

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>5.1</b> | <b>INTRODUCTION</b> .....                       | <b>75</b> |
| <b>5.2</b> | <b>ARCHITECTURE DES SYSTEMES HYBRIDES</b> ..... | <b>75</b> |

---

|                                  |   |            |
|----------------------------------|---|------------|
| 5.2.1                            | Architecture a bus CC.....  | 75         |
| 5.2.2                            | Architecture a bus CC /CA .....   | 76         |
| <b>5.3</b>                       | <b>APPLICATION DE LOGICIEL HOMER POUR L'OPTIMIZATION :<br/>SOUK AHRAS .....</b> | <b>77</b>  |
| 5.3.1                            | Présentation de l'outil de simulation .....                                     | 77         |
| 5.3.2                            | L'emplacement choisit .....   | 77         |
| 5.3.3                            | Construction de système hybride de génération d'énergie .....                   | 81         |
| 5.3.4                            | Simulation et interprétation .....  | 82         |
|                                  | 5.3.4.1 <i>Le générateur photovoltaïque</i> .....                               | 84         |
|                                  | 5.3.4.2 <i>Le générateur éolien</i> .....                                       | 85         |
|                                  | 5.3.4.3 <i>Le générateur diesel</i> .....                                       | 85         |
| <b>5.4</b>                       | <b>SYSTEME HYBRIDE EOLIEN-DIESEL .....</b>                                      | <b>87</b>  |
| 5.4.1                            | Principe de fonctionnement d'un système hybride éolien diesel.....              | 87         |
|                                  | Configuration et simulation de modèle.....                                      | 88         |
| <b>5.5</b>                       | <b>CONCLUSION.....</b>  | <b>92</b>  |
| <b>CONCLUSION GENERALE .....</b> |   | <b>93</b>  |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>        |   | <b>95</b>  |
| <b>ANNEXE1.....</b>              |   | <b>103</b> |
| <b>ANNEXE 2 .....</b>            |   | <b>107</b> |
| <b>ANNEXE 3 .....</b>            |   | <b>111</b> |

# **INTRODUCTION**

## **GÉNÉRALE**

Depuis la révolution industrielle la consommation totale d'énergie électrique dans le monde entier est augmentée, elle a plus que doublé en 40 ans (de 1973 à 2013). La grande partie de l'énergie électrique utilisée par l'humanité provient des énergies fossiles. Selon l'agence internationale de l'énergie, ses ressources conventionnelles représentent 80,4 % de production d'énergie globale, elles sont à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO2 [1] [2].

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 dans le *Protocole de Kyoto* 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 [3].

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici et au future, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables, 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 [4].

Une autre problématique s'ajoute à celles détaillées dans les deux paragraphes précédents, celle des sites isolés, plus de deux milliards de personnes disséminées dans des régions isolées. Dans ces secteurs l'approvisionnement électrique dépend seulement des systèmes de génération diesel autonomes, outre le coût de carburants ne cesse d'augmenter, en plus l'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcout d'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement, ce qui rend la production d'électricité économiquement très dispendieuse, ce qui traduit l'application d'une solution parfaite comme une production d'énergie décentralisée, à savoir les *Systèmes Hybrides de génération d'énergie*[5].

Un système hybride de génération d'énergie électrique provient un choix remarquable pour pallier aux problèmes d'alimentation des sites isolés, sa combinaison de plusieurs sources génère une particularité et leur fonctionnement aussi. La diversification en termes de sources d'énergie pour ce système reste un avantage majeur pour limiter le problème de fluctuation des sources renouvelables. Cependant leur installation nécessite une étude de

dimensionnement des organes représentant le système pour définir un fonctionnement idéal [6]. Un système de commande est indispensable si on choisit de combiner entre plusieurs générateurs d'énergie.

Dans ce contexte général, le travail présenté dans ce mémoire est la contribution à l'étude d'un système hybride de génération d'énergie basé sur les énergies renouvelables destiné aux sites isolés.

La présentation de ce manuscrit est étalée sur cinq chapitres :

✍ D'abord, et après cette introduction, dans la première partie de premier chapitre sera consacré au recensement des différentes sources d'énergies renouvelables. La deuxième partie est consacrée à un état de l'art sur les systèmes hybrides de génération de l'énergie électrique.

✍ Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la source conventionnelle représentée par le groupe électrogène diesel qui permet d'assurer la continuité de service de production d'énergie, des tests de simulation sont présentés numériquement sur l'environnement Matlab/Simulink.

✍ Dans le troisième chapitre on présente la modélisation et la validation numérique par le logiciel Matlab/Simulink d'une chaîne de conversion éolienne composée d'une turbine associée à une génératrice asynchrone auto-excitée.

✍ Le quatrième chapitre est consacré à l'étude théorique sur le principe de fonctionnement suivie par une la modélisation des panneaux photovoltaïques. Pour valider le modèle du panneau, des tests de simulation sur l'environnement Matlab/Simulink d'une cellule photovoltaïque autonomes connectée directement à une charge.

✍ Dans le dernier chapitre on présente des simulations numériques par le logiciel HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables), d'un système hybride réel éolien-diesel-solaire pour un site isolé de la région de Souk-Ahras, à travers les résultats obtenues par le logiciel HOMER, on arrive à la nécessité d'installer un système hybride jumelé éolien-diesel pour les zones rurales de la région de Souk-Ahras. Des tests de simulation numériques ont été réalisés sur l'environnement Matlab/Simulink pour bien démontrer les performances du système choisi.

Enfin les principaux résultats de ce travail de recherche et les perspectives sont données dans une conclusion générale.

# **CHAPITRE 1**

**GENERALITES ET ETAT DE L'ART DES  
SYSTEMES HYBRIDES DE GENERATION  
D'ENERGIE ELECTRIQUE**

## **1.1 INTRODUCTION :**

Actuellement, la plus grande part de la consommation énergétique mondiale est dédiée à la production d'électricité. L'abondance des réserves de charbon et leur faible coût d'exploitation expliquent que le charbon soit économiquement avantageux et arrive en tête dans les ressources exploitées pour la production d'électricité. En revanche, l'impact environnemental du charbon est remarquable même avec la présence des technologies plus récentes et moins polluantes. Ensuite vient le gaz naturel avec la turbine à gaz à cycle combiné qui est la principale technologie de la production d'électricité mise en service dans le monde [1]. En troisième place on trouve le nucléaire. Certainement le pétrole est peu utilisé pour la production d'électricité à l'échelle mondiale mais en parallèle on le trouve avec le gaz à la première place pour la production de l'électricité dans notre pays l'Algérie[7]. Les autres énergies sont surtout représentées par les énergies renouvelables, l'hydroélectricité en tête. Certains pays produisent l'essentiel de leur électricité grâce aux barrages et aux cours d'eau.

Dans le monde entier les chercheurs demandent en urgence de faire changer la vision ancienne pour la production d'électricité, ils appellent aux ressources d'énergies renouvelables qui vont prendre la base d'autres ressources fossiles afin de répondre aux exigences actuelles [8]. Une alternative intéressante et puissante comme celle de l'énergie solaire et l'éolienne ont attirées l'attention au niveau de la production de l'électricité à grande échelle. Cependant elles présentent un inconvénient commun par leur caractère imprévisible et la dépendance des conditions météorologiques et climatiques qui changent avec le temps [9].

Pour cela les systèmes hybrides combinent entre plusieurs formes d'énergie font l'axe principal de plusieurs travaux de recherches pour les sites éloignés de réseau électrique.

Dans la première partie de ce chapitre on va exposer l'historique et la croissance de l'exploitation des énergies renouvelables et ses applications dans le domaine de production de l'électricité, ainsi que les différentes structures des systèmes hybrides de génération d'énergie électrique et leur état de l'art actuel.

## **1.2 LES ENERGIES RENOUVELABLES :**

### **1.2.1 La croissance de l'exploitation des énergies renouvelables :**

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre selon le protocole de Kyoto ; rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie, un fait qui interpelle plus fort que jamais le développement des énergies renouvelables[10]. On

dit que la source d'énergie est renouvelable si le fait de faire la consommer n'influence jamais sur sa quantité, ni faire limiter son utilisation au future. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables [2].

Le besoin d'une alternative renouvelable pour faire produire l'électricité a été le sujet de discussion pour plusieurs secteurs et aux niveaux d'un grand nombre de pays au monde entier. Les études ont été élaborées pour faire de cet outil non polluons l'axe de recherche pour plusieurs chercheurs afin de réaliser un but majeur celle de minimiser les effets négatives de ressources classiques de production de l'énergie. L'Algérie est parmi les pays qui ont appelés à diversifier ses ressources économiques voir énergétiques de manière à limiter sa dépendance au pétrole et au gaz. Selon monsieur Brahim Zitouni directeur de la société émiratie de la biotechnologie [11]. Selon lui, les projets de type "Desertec" dont le pays à la juste volonté de se doter propose en filigrane de faire basculer graduellement le système énergétique algérien, en particulier dans sa dimension de production électrique vers l'énergie solaire.

### 1.2.2 Production de l'électricité par les énergies renouvelables :

Y'on a pleinement d'énergies qui rentrent dans cette catégorie, elles sont classées comme suit (figure 1.1)

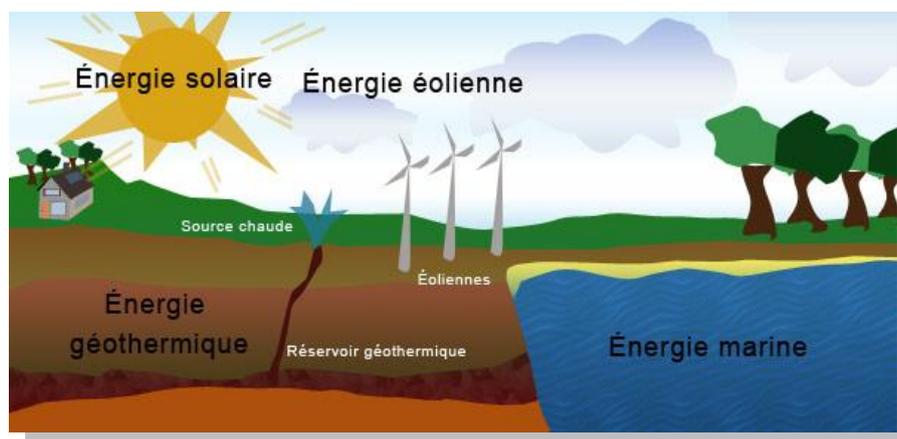


Figure 1.1 Les énergies renouvelables

#### 1.2.2.1 L'hydraulique :

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice (figure 1.2). La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue

derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source à l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexées, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [12].



Figure 1.2 Un moulin à eau

### 1.2.2.2 Le solaire :

Deux grand types d'énergies rentrent au-dessous de cette catégorie, la première thermique se base sur la température qui permet essentiellement de faire chauffer l'eau afin de produire une pression mesurable, on l'appelle aussi la production combinée de chauffage par plancher chauffant [2]. La deuxième photovoltaïque basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire (figure 1.3).

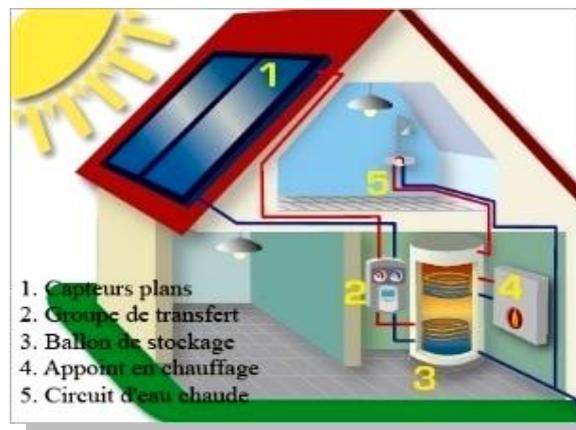


Figure 1.3 Énergie solaire thermique

On peut la considérer comme une énergie propre puisque sa production énergétique à partir des modules PV n'engendre pas de déchets impliquant la pollution à la terre. Cette ressource a toutefois deux inconvénients, la production est invariablement liée aux conditions climatiques et une surface considérable est nécessaire pour produire de grande quantité d'énergie puisque le rendement des panneaux PV est relativement faible [12].

### ***1.2.2.3 L'éolienne :***

Les énergies éoliennes sont notamment caractérisées par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique par l'intermédiaire d'un rotor et de pales. Cette source est non polluante. Néanmoins l'énergie éolienne est intermittente, et l'installation de parc éolien engendre des impacts paysagés et sonores [13].



***Figure 1.4 Moulins à vent***

### ***1.2.2.4 La biomasse :***

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Des différents types sont à considérer : le bois énergie, les biocarburants et le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde [14]. Il s'agit aussi d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse ce qui est bien montré par la (figure 1.5). Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. Le problème plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable [12].

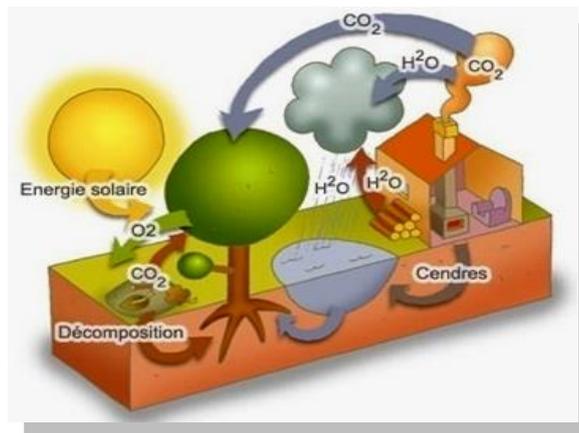


Figure 1.5 Énergie Biomasse

### 1.2.2.5 La géothermie :

Le terme géothermie provient du grec <Ge> et <thermos>, signifiant respectivement : la terre et la chaleur. La géothermie peut se définir comme étant la technique qui consiste à puiser dans le sous-sol ou dans les roches, les calories qui y sont contenues, afin de les rendre disponibles en surface pour des applications de chauffage ou de production d'électricité. Dans des cas particuliers, la géothermie peut consister à injecter de la chaleur dans le sous-sol afin de refroidir les installations de surface. Différents sources de chaleurs sont à l'origine de la chaleur interne de la terre : la radioactivité, la chaleur initiale, la chaleur de différenciation et les mouvements différentiels [15]. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques ; c'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas très élevé [14].

### 1.2.2.6 Les énergies marines :

L'énergie marine ou des mers est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice (issue du mouvement de l'eau créé par les marées), l'énergie des vagues (utilise la puissance du mouvement des vagues), l'énergie thermique des mers (produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans), les éoliennes offshore, et l'énergie osmotique (diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer). Tout comme les autres sources renouvelables, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir [16].

### **1.2.2.7 L'hydrogène :**

Dans le domaine de la recherche, une autre énergie a le vent en poupe. Très abondante, plus énergétique que le pétrole ou le gaz naturel, ni polluante, ni toxique, elle pourrait, du moins en théorie, répondre à tous nos besoins l'hydrogène tout ça à cause de ses avantages :

- ✓ l'hydrogène peut être produit à partir de sources d'énergie propre.
- ✓ l'hydrogène peut être stocké et distribué dans une variété de formes.
- ✓ l'hydrogène peut remplacer les combustibles fossiles pour fournir de l'électricité de manière différente. Il peut être utilisé comme carburant pour alimenter le moteur à combustion pour la production d'électricité en faisant tourner la machine. Il peut également être directement utilisé par un électro-réacteur chimique dans les piles à combustible pour produire de l'électricité. Pour les puissances élevées la conversion la plus efficace de l'hydrogène à l'électricité peut être atteinte en production combinée en chaleur [17].

## **1.3 PRESENTATION DE SYSTEME HYBRIDE :**

### **1.3.1 Etat de l'art sur le système hybride de génération d'énergie:**

Pour les sites isolés et les zones éloignées du réseau électrique classique, la possibilité d'être connecter avec ce réseau reste un problème majeur au faite que le prix d'extension est prohibitif en parallèle avec l'augmentation de prix du combustible aussi. En évidence le prix des générateurs basés sur l'énergie renouvelable connaissent une baisse continue de prix au même temps une fiabilité croissante, ses avantages ont menés à une utilisation importante de génération de l'énergie électrique par les énergies renouvelables.

La relation qui mène ses énergies renouvelables au limite de l'utilisation à propos la variabilité des ressources et la fluctuation des charges selon les périodes annuelles et journalières liées aux conditions climatiques par exemple font l'objet d'une solution plus générale au niveau de la génération de l'énergie électrique , celle qui entraine une présence d'un système hybride de génération d'énergie rentre en application pour servir de l'énergie électrique aux relais de télécommunication, des postes frontières, l'habitat isolé, les dispensaires ...etc. Plusieurs applications et recherches peut y avoir connaitre dans des endroits déférents dans le monde entier. A Khartoum [18] pour une utilisation d'un système hybride afin d'alimenter des petites maisons, l'Inde [19] pour une intégration d'un système hybride dédié à fournir de l'énergie électrique pour des iles isolées et l'Arabie saoudite en [20] pour une étude présenté dans le cadre d'examiner la possibilité de l'utilisation d'un système hybride pour répondre au besoin de demande de l'énergie électrique à une petite

village qui s'appelle Qtqt.

Dans la littérature on trouve que les systèmes hybrides ont été étudiés pour un critère de fonctionnement isolé ou bien relié à un réseau électrique. Dans [21] une étude complète d'un système hybride éolien/photovoltaïque/diesel autonome été présentée, les résultats ont été bien illustrées, préfèrent cette installation en comparaison avec d'autres installations basées sur une source renouvelable ou deux.

Plusieurs paramètres rentrent dans l'étude des systèmes hybrides, le dimensionnement de système est le premier a considéré, malgré que dans la littérature, il est difficile de trouver comment dimensionner les différents composants d'un système autonome. La plupart des ouvrages portent sur la théorie de base des technologies, mais rarement sur le dimensionnement précis des équipements de base (par exemple les panneaux solaires, les éoliennes ou bien les génératrices). Les articles quant à eux ne fournissent pas ces informations, mais plutôt des informations très spécifiques sur l'étude réalisée et des comparaisons des résultats. Dans [9] on trouve une nécessité d'avoir une méthode d'optimisation pour garantir une efficacité de fonctionnement pour un système hybride autonome éolien/photovoltaïque. La méthode étudiée par les auteurs est basée sur l'algorithme génétique pour une optimisation parfaite du système en comparaison avec les méthodes classiques utilisées. Un autre travail présenté par *Riad Chedid* et *Saifur Rahman* dans [3] donne un outil qui aide à déterminer une bonne configuration d'SH afin de bénéficier d'une construction optimale. Dans la même conception et dans [22], les auteurs ont fait apparaître une méthode d'analyse pour l'optimisation du même système.

L'architecture, et même le choix de la stratégie de fonctionnement de système hybride peut aussi influencer sur l'image complète du système. D'autres paramètres permettent de faire évaluer les performances comme l'économie de carburant, le coût du KW, le nombre et la durée des pannes et le nombre d'arrêts pour l'entretien [6].

### **1.3.2 Les principaux composants d'un système SH :**

Les énergies renouvelables comme les panneaux photovoltaïques, l'énergie éolienne ou bien l'énergie hydraulique sont souvent utilisées dans les SH, ses systèmes peuvent inclure d'autres composants comme les convertisseurs statiques et dynamiques, des batteries pour le stockage de l'énergie, et aussi bien des charges principales et des charges de délestage. La majorité de ses éléments se travaillent en parallèle pour introduire un système équilibré sert à bien fonctionner afin d'atteindre un but précis.

### 1.3.2.1 Le générateur éolien :

Parmi les différents générateurs d'énergie renouvelable utilisés dans le système d'énergie hybride, l'éolienne est techniquement et économiquement la plus développée. En général, on peut la classer en trois catégories : [17]

- Système éolien sans convertisseur électronique : La plupart de ces topologies sont fondées sur une machine asynchrone à cage d'écureuil directement connectée à la grille. Il contient un démarreur utilisé pour réduire le courant d'appel pendant le démarrage et des batteries de condensateurs nécessaires pour compenser la puissance réactive. À l'ajout des convertisseurs électroniques de puissance la complexité et le coût du système sera augmenté, mais au contraire le contrôle du processus de la puissance sera bien évidemment plus précis.
- Système éolien à l'aide partielle de convertisseur électronique : une structure particulière de cette topologie basée sur l'utilisation d'une machine asynchrone à rotor bobiné, cette bobine peut être alimentée par un convertisseur électronique afin d'atteindre une plage de vitesse variable de 2% à 4%.
- Système éolien à l'aide complet du convertisseur électronique : dans cette configuration on peut utiliser une machine asynchrone à cage d'écureuil ou bien une machine synchrone, l'application de convertisseur électronique peut s'impliquer à éliminer la boîte de vitesse.

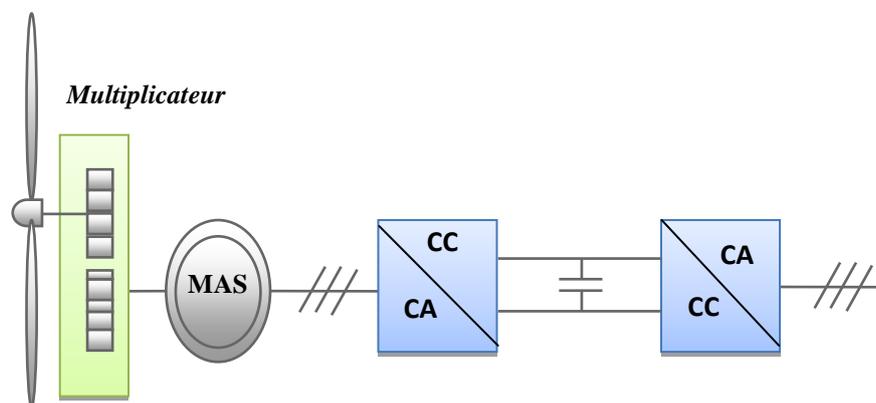


Figure 1.6 Chaîne de conversion avec une génératrice asynchrone et convertisseurs statiques

Plusieurs endroits utilisent ce générateur pour une production autonome, les exemples sont nombreuses, on va citer quelques-uns présentés dans la Figure 1.7.



Figure 1.7 Eolienne installée à : a) Mongolie b) McMurdo Station Antarctica c) Coyaique, Chile

### 1.3.2.2 Le générateur photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène, les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier le pair électron / trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. D'autres structures peuvent également être utilisées [23].

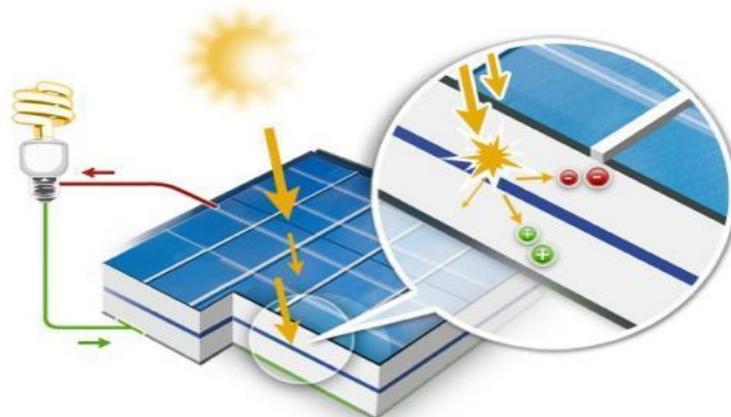


Figure 1.8 Principe du fonctionnement d'un GP

En parallèle avec l'installation des générateurs éoliens, on va citer quelques endroits où l'installation des PV fait partie de la production énergétique.



Figure 1.9 Peneaux solaire installé à: a) Rope Marina b) Parker Ranch c) Brazil

### 1.3.2.3 Générateur diesel :

Dans le cas des installations à sources d'énergies renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone. La fréquence du réseau est liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré. Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive. Quand le générateur diesel fournit de l'énergie au réseau, il sera connecté généralement à un bus CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels [6].

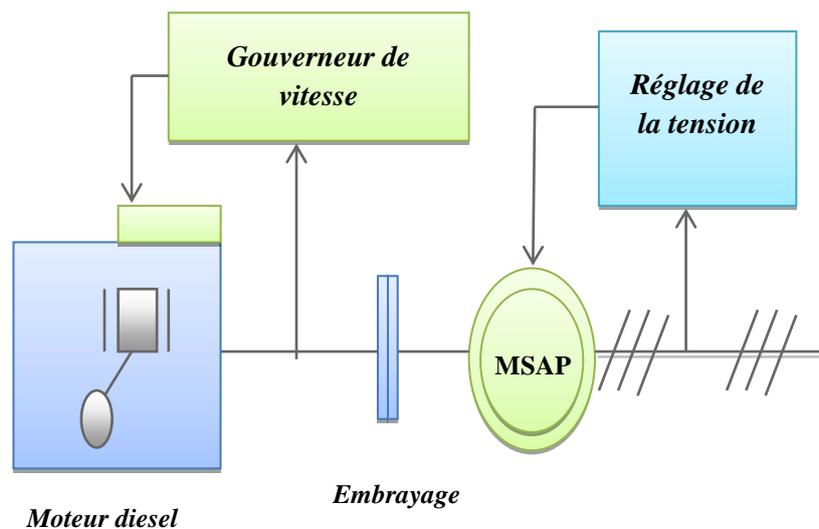


Figure 1.10 Configuration de générateur diesel

#### 1.3.2.4 Batteries de stockage :

Bien que le développement scientifique se poursuive, le stockage de l'énergie électrique est toujours un défi. L'utilisation d'une batterie est très importante dans tous les systèmes hybrides. Le système de batterie permet de résoudre l'inconvénient majeur des énergies renouvelables celle de non continuité de production de l'énergie dans des situations spécifiées, les batteries construit par l'acide et du plomb compromettent l'efficacité à être chargée et déchargée pour une longue période ce qui les rend idéales à l'application avec des systèmes des énergies renouvelables. Actuellement, les batteries plomb-acide ont une efficacité aller-retour d'environ 75% et une espérance de vie de 20 ans [24].

#### 1.3.2.5 Système de supervision :

Pour bien maîtriser la commande d'un système hybride on doit appliquer avec lui un système de supervision, cet outil nous permet de bien pouvoir englober tous les informations des composants de système, parfois la commande est intégrée individuellement pour les différents éléments comme les batteries des charges qui incluent un système de commande pour empêcher la surcharge des batteries.

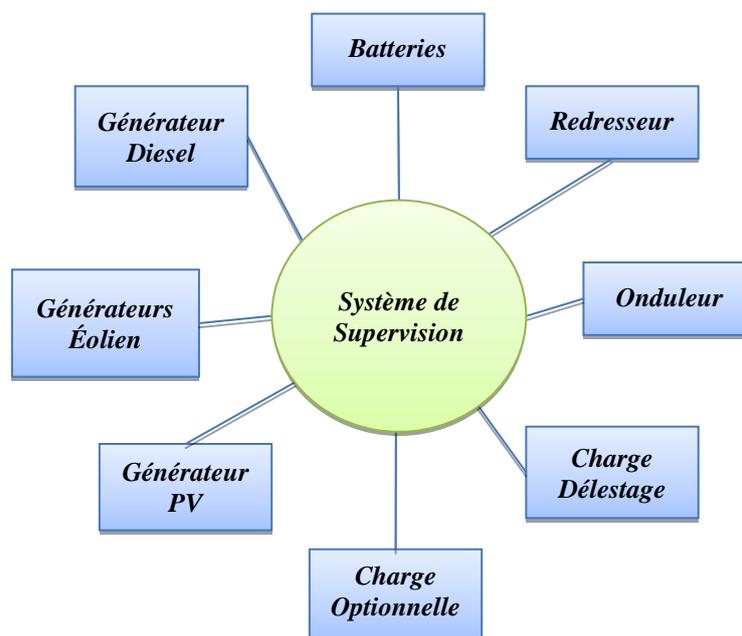


Figure 1.11 Système de supervision

Dans la même vision et dans [23] les auteurs ont proposé plusieurs méthodes de commande et de supervision pour un système hybride, afin de faire une interaction entre un superviseur et un processus ce qui prend un modèle plus proche du système réel. Les travaux ont été faits

pour une modélisation et analyse d'une stabilité d'un système hybride. Les aspects théoriques ont été utilisés avec des réseaux de petri et de logique flou pour un apprentissage afin de bien vouloir maîtriser le modèle de supervision et faire l'appliquer pour résoudre les problèmes de stabilité.

#### **1.3.2.6 Les convertisseurs :**

Leur utilité sert à charger les batteries de stockages et faire la conversion électrique par la transformation de CC au CA et inversement, dans la structure des SH on trouve trois types de convertisseurs les redresseurs, les hacheurs et les onduleurs. Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA, ce sont des appareils relativement simples, pas chers et a bon rendement.

Les onduleurs sont des convertisseurs CC/CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer le fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur ; Ceux-ci sont les plus flexibles, mais aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

Les hacheurs sont des convertisseurs qui permettent de réaliser la conversion CC /CC pour adapter la tension entre deux sources [25].

#### **1.3.2.7 Les charges :**

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe deux charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et de courant pendant les changements dans le fonctionnement de système [6].

### **1.4 STRUCTURE DES SYSTEMES HYBRIDES :**

Les systèmes hybrides d'énergie électrique associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs diesels, et au moins une source d'énergie renouvelable. Les sources d'énergies renouvelable, comme l'éolienne et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance

constante ; leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergies hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés [5]. On trouve plusieurs structures des systèmes hybrides pour une génération d'énergie électrique parmi eux :[17]

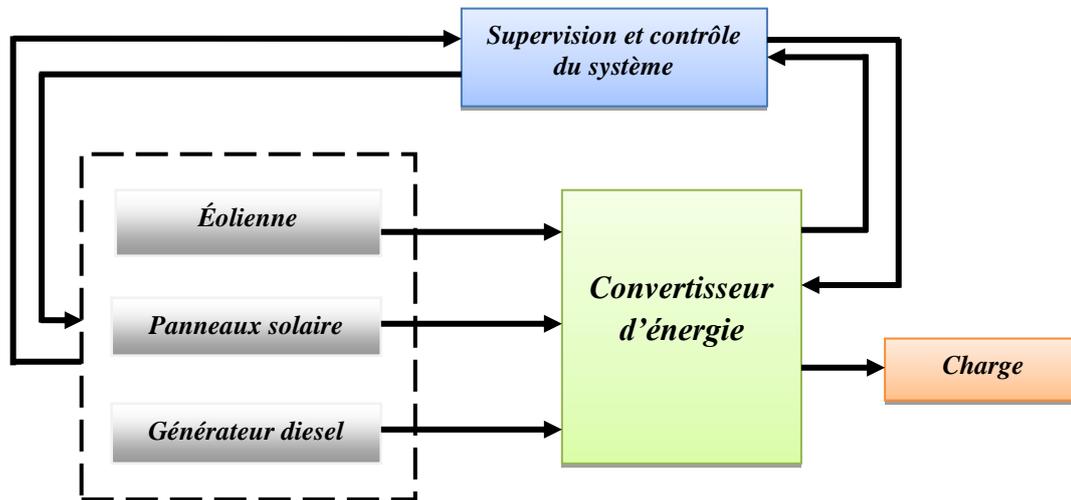


Figure 1.12 Structure d'un SH Eolien/PV/Diesel connecter à une charge

#### 1.4.1 Système hybride à base d'énergies renouvelables primaire seulement:

Dans ce type de structures deux ou plusieurs sources renouvelables peuvent être associées à des avantages complémentaires. Par exemple si on prend le système PV-Eolien qui est souvent utilisé, on remarque que les panneaux photovoltaïques fournissent de l'énergie la journée et les éoliennes la produisent à la force du vent dans la nuit. Certains travaux prennent la modélisation et l'analyse des systèmes pareils. Dans [26] et [27] les auteurs présentent une étude d'optimisation pour un système éolien photovoltaïque. Une modélisation du même système est présentée par *T. Jacob* et *S.Arun* dans [28] ; les auteurs ont utilisés une nouvelle technologie pour un convertisseur utilisé afin d'alimenter la charge par les sources d'énergie séparément ou bien simultanément. Dans [4] *M. Muralikrishna et al* présentent un système éolien photovoltaïque pour une utilisation dans des zones rurales.

#### 1.4.2 Système hybride à base d'une ou plusieurs énergies renouvelables avec unité de secours :

Dans ce cas et en raison de la disponibilité intermittente des énergies renouvelables, des unités d'alimentation de secours sont généralement intégrées comme le générateur diesel, le micro turbine à gaz et les piles à combustible pour avoir une alimentation sans interruption et permanente. Ce système peut associer plusieurs types de sources d'énergies à fin de construire

un système plus puissant plus fiable et plus sécurisé. Le fameux système inclut dans cette catégorie et le système hybride éolien photovoltaïque diesel. Dans l'article [21] *Rekiou et al* présentent une étude de gestion d'énergie pour les différentes sources, assurée par un outil qui commande l'ouverture et la fermeture des commutateurs selon les conditions météorologiques. Dans [29] les auteurs présentent le même système pour l'alimentation d'un village à la Saoudite Arabie et dans [30] pour une implémentation de système hybride dans le sud du Malaysia présentée par *Mei Shan Ngan et al.*

### 1.4.3 Système hybride à base d'énergie renouvelable avec un système de stockage :

L'association des batteries de stockage d'énergie avec des sources d'énergies renouvelables peuvent assurer la fiabilité et la sécurité du système de production d'énergie décentralisée, tout en maximisant les avantages provenant de sources renouvelables.

Une modélisation de ce système est présentée dans les articles [31] et dans [32] pour une installation autonome. Un autre travail intéressant fait partie de l'article [24] présenté par *T. R. Mtshali et al* dans le cadre d'une modélisation et une simulation d'un système éolien photovoltaïque associé à des batteries. Les résultats de ce travail montrent que le système spécifié est délicat et puissant. Il est bien opérationnel dans des zones isolées, il requiert un moins travail de maintenance et une stabilité remarquable avec une intégration d'un nouvel bus de control.

## 1.5 CLASSIFICATION DES SYSTEMES HYBRIDES :

Le champ d'application des systèmes hybrides est trop vaste à cause des multiples structures, cette richesse en structure mène la tâche de classification des systèmes un peu compliqué, on peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance selon le tableau suivant [6].

| Puissance du SH en KW          | Application  |
|--------------------------------|--|
| <b>Faible &lt; 5</b>           | Système autonome : station de télécommunication, pompage de l'eau, autres applications isolés. |
| <b>Moyenne entre 10 et 250</b> | Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales...                   |
| <b>Grande &gt; 500</b>         | Grand réseaux isolés   |

*Tableau 1.1 Classification des SH par gamme de puissance*

Si on prend l'exemple d'un système hybride éolien-diesel, on peut voir une classification

particulière qui sépare ses générateurs selon le taux de pénétration de l'énergie éolienne et donne leurs caractéristiques de fonctionnement par le tableau suivant donnant trois types [33].

| Niveau de pénétration | Caractéristique de fonctionnement   | pénétration    |                  |
|-----------------------|---|----------------|------------------|
|                       |   | Pic instantané | Moyenne annuelle |
| <b>faible</b>         | -GD fonctionne sans arrêt.<br>-La production éolienne réduit la charge du diesel.<br>-Toute l'énergie éolienne alimente la charge principale.<br>-Il n'y a pas de système de supervision  | < 50%          | < 20%            |
| <b>moyen</b>          | -GD fonctionne sans arrêt.<br>-Commande relativement simple.<br>-Pour des niveaux élevés d'énergie éolienne, des charges secondaires sont réparties pour assurer une charge suffisante pour le diesel ou la production éolienne est réduite | 50%-100%       | 20% - 50%        |
| <b>Elevé</b>          | -GD peut être arrêté en fonction de la production éolienne.<br>-Systèmes auxiliaires pour contrôler la tension et la fréquence.<br>-Commande complexe   | 100%-400%      | 20% -150%        |

**Tableau 1.2** Classification des systèmes Eolien-Diesel basés sur le taux de pénétration de L'énergie éolienne

## 1.6 PROBLEMES RENCONTRES DANS LE FONCTIONNEMENT DES SH :

Plusieurs problèmes peuvent se manifester durant le fonctionnement du système hybride, les causes sont nombreuses mais en général sont liées aux :

- Variations de l'énergie d'origine renouvelable.
- Manque de connaissance dans le domaine de la quantité de l'énergie en réseau fiable.

La solution aux variations brusques de changement de demande de l'énergie par la charge pour un système SH réside dans le fonctionnement parallèle des générateurs à énergies renouvelables avec les générateurs diesels. Dans ce type de fonctionnement, les sources d'énergie renouvelable agissent comme une charge négative, en réduisant la charge moyenne des générateurs diesel, ces derniers peuvent fonctionner à une puissance très basse, mais l'économie de carburant est modeste à cause du rendement très faible. Ainsi et au but de garder un moteur diesel au régime de ralenti pour une demande de puissance nulle suppose une consommation de carburant non négligeable [5].

Le fonctionnement de générateur renouvelable peut causer des problèmes aux systèmes SH si le démarrage est influencé par des perturbations externes ou bien internes. Dans ce cas la production de l'énergie électrique peut-être connu des changements rapides ce qui résulte des variations de tension et de fréquence impliquant une mauvaise qualité d'énergie qui peut détruire des appareils électroniques sensibles.

Un autre problème peut persister dans le cas où la production de l'énergie électrique par les générateurs renouvelables est suffisante à la demande de la charge. Dans ce cas la quantité de carburant économisé peut alors être augmentée en faisant fonctionner les générateurs diesels en intermittence. Ces générateurs démarrent et s'arrêtent en fonction de la variation de l'énergie renouvelable et de la charge.

Parfois la production de l'énergie renouvelable soit plus importante que la consommation de l'énergie, la présence d'un système de stockage comme les batteries peut se fonctionner en faveur. Rendu compte que pour un système sans stockage l'utilisation d'une charge de délestage est indisponible afin de maintenir l'équilibre énergétique et la stabilité de tension et de fréquence.

Plusieurs études et recherches ont été élaborer afin de comprendre et trouver des solutions aux problèmes de fonctionnement des SH. *Muljadi* and *H.E. McKenna* dans [34] ont fait un travail d'analyse concernant un type de SH éolien diesel, ils ont trouvé que plusieurs facteurs contribuent à la fluctuation de voltage parmi eux :

- Une chute de tension causée par les surtensions des courants de charges.
- Le démarrage de machine asynchrone dans l'éolienne produise une puissance réactive jouant un rôle de déséquilibre de puissance dans le système. L'utilisation d'une MAS de petite taille en la démarrons en douceur peut supprimer le problème.
- Des variations en fréquence lorsque l'éolienne produit plus de puissance que nécessaire, dans ce cas le moteur diesel perd le contrôle de sa vitesse de rotor.

De nombreuses solutions techniques peuvent être mises en œuvre pour remédier aux problèmes ci-dessus. Toutefois dans toute production d'électricité, les implications économiques des solutions doivent être examinées très attentivement. Dans le même aspect la tâche de diagnostic des systèmes hybrides est trop importante pour trouver des solutions aux problèmes qui apparaissent dedans les systèmes SH.

Dans [35]l'auteur a bien présenté des méthodes de diagnostic des systèmes hybrides basés sur l'utilisation d'un modèle afin d'atteindre un objectif de diagnostiquer les problèmes à partir de la connaissance structurelle, comportementale ou fonctionnelle du système, en représentant ces connaissances séparément de la connaissance sur la tâche de diagnostic. Le travail qu'il a fait est devisé en deux étapes, La première étape consiste à détecter à l'aide d'une classification floue, les fautes qui présentent les mêmes symptômes à partir d'une connaissance préalable des états de défaillance obtenues par apprentissage afin de réduire les chemins ou les scénarios à explorer lors de la deuxième phase. La deuxième étape sert à diagnostiquer la faute parmi celles détectées à l'étape précédente.

## **1.7 CONCLUSION :**

Dans la première partie de ce chapitre nous avons donné une présentation détaillée des différentes sources d'énergies renouvelables qui existent, tel que l'énergie hydraulique, solaire, éolienne, biomasse et géothermique...etc. Dans la seconde partie nous avons étalé la définition et les différentes structures des systèmes hybrides de génération de l'énergie électrique, où nous avons constaté que l'avantage principal de l'utilisation des sources renouvelables dans la construction d'un système hybride peut aider à résoudre plusieurs problèmes qui apparaissent au niveau de l'impact de l'utilisation des ressources classiques sur l'environnement et plus précisément comme une émission de gaz à effet de serre.

# **CHAPITRE 2**

**MODELISATION ET SIMULATION  
DU GROUPE DIESEL**

## 2.1 INTRODUCTION :

La production de l'énergie électrique fait partie d'une multitude solutions parmi eux le générateur diesel ou bien le groupe électrogène, ce dernier peut est considéré comme un dispositif autonome capable de produire de l'énergie électrique, bien qu'il soit constitué généralement d'un moteur diesel et d'une machine synchrone généralement à aimant permanent. La taille et le poids de système peut se varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes [36].

Plusieurs sont les applications qui utilisent les groupes électrogènes, on les trouve installés dans des zones non couplées au réseau d'énergie, pour l'alimentation des centres de communications comme illustré dans l'article [37]. Le coût et la souplesse d'installation de ce dernier peut jouer un rôle favorable en comparaison avec d'autres solutions. Dans le même concept on le trouve associé avec d'autres générateurs d'énergie électrique en construisant un système hybride capable de fonctionner en toute simplicité et en bénéficiant d'avantage globale [33]. Une autre application peut se traduire comme un système de secours dans une centrale nucléaire afin d'assurer l'alimentation électrique des auxiliaires de sûreté, dans ce cas ils fonctionnent rarement mais ils doivent être disponibles à tout moment et capable d'atteindre une tension et une fréquence nominale en une dizaine de secondes seulement après la réception de l'ordre de démarrage [38]. Ils peuvent se fonctionner aussi en fourniture d'énergie auxiliaire pour limiter la puissance de pointe absorbée sur le réseau d'énergie. On les trouve aussi dans des applications embarquées tirant leur énergie d'un moteur thermique afin d'alimenter toutes applications auxiliaires embarquées à énergie électrique, notamment électroniques, de plus en plus nombreuses dans les véhicules modernes [36]. Le tableau suivant nous donne une image sur les familles d'applications des groupes électrogènes, ce qui concerne la puissance en inclut la vitesse de rotation pour chaque type.

| Vitesse de rotation | Type        | Puissances      | Applications        |
|---------------------|-------------|-----------------|---------------------|
| 3000 tr/min         | Rapide      | Faible          | Domestiques-secours |
| 900<N<1800tr/min    | Rapide      | Moyenne<5000KVA | Production-secours  |
| 350<N<900 tr/min    | Semi rapide | Forte 4<20 MVA  | Production-secours  |
| N<350 tr/ min       | lent        | Forte           | Production          |

*Tableau 2.1 : Familles d'applications des groupes électrogènes*

Dans ce chapitre on va présenter la constitution et le principe de fonctionnement du groupe

électrogène traditionnel, ainsi que son modèle mathématique qui peut également utilisé pour faire des tests de simulation sous l'interface Simulink du logiciel Matlab.

## **2.2 LE GROUPE DIESEL :**

Dans le marché plusieurs types de groupes électrogènes existent, leur utilisation génère la différence et leur fonctionnement aussi. La génératrice diesel traditionnelle nous intéresse comme étant composée d'un moteur diesel tournant à vitesse fixe accouplé à un alternateur synchrone produisant de l'énergie électrique selon le besoin. Un autre type des groupes électrogènes fonctionnant à vitesse variable sont basés sur l'association d'un alternateur fonctionnant à vitesse et puissance variables entraîné par un moteur diesel et un convertisseur. Une autre nouvelle catégorie des groupes électrogènes pouvant constituer à terme un concurrent sérieux des groupes électrogènes classiques ; il s'agit des piles à combustible qui convertissent directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique, de façon statique, pas de mouvement avec un rendement élevé [38].

### **2.2.1 Groupe diesel fonctionnant à vitesse fixe :**

Ce type de groupe électrogène est constitué d'un moteur diesel qui tourne à vitesse constante relié avec une machine synchrone. En parallèle avec sa simplicité, ce groupe diesel présente quelques points négatifs comme le volume sonore qui est plus grand et constant, un niveau d'émission polluante élevé même lorsque la demande d'énergie est faible, une mauvaise stabilité de fréquence et de tension dans le démarrage et une présence d'un second moteur diesel en plus du moteur principal pour des applications embarquées [36].

Pour ce type de moteur la vitesse doit être constante et stable ce qui traduit une nécessité d'avoir un système de commande puissant et fiable, dans [39] *H. Wei*, présente un système de contrôle basé sur la logique flou, une comparaison des performances avec les autres applications est faite indiquons que cette méthode de logique flou est mieux réalisable que les autres.

### **2.2.2 Groupe diesel fonctionnant à vitesse variable :**

Dans le cadre des recherches d'amélioration concernant le premier type celle à vitesse fixe, le générateur diesel à vitesse variable semble être une solution parfaite au niveau de rendement et de fiabilité [40]. Ce groupe électrogène est basé sur l'association d'une machine génératrice fonctionnant à vitesse et puissance variables entraînée par un moteur diesel et un convertisseur statique qui alimente une charge. L'association d'un convertisseur statique avec

l'alternateur nous permet de bien maîtriser une variation de fréquence et de puissance à l'état de sortie.

Dans la littérature plusieurs travaux de recherches qui s'adressent à étudier ce moteur. Dans [41] *JH. Lee et al* présentent une étude d'un moteur diesel fonctionnant à vitesse variable afin de vérifier l'avantage de ce dernier en diminuant la consommation de carburant qui diminue l'émission de gaz à effet de serre. Dans [42] l'auteur présente une modélisation et simulation d'un moteur diesel à vitesse variable connecté à une génératrice asynchrone à double alimentation. Dans [43] *A. Kumar et al* présentent une étude d'optimisation basée sur des résultats expérimentaux pour un moteur diesel à vitesse variable connecté à une génératrice asynchrone.

### **2.3 DIMENSIONNEMENT DU GROUPE DIESEL :**

La puissance générée par le groupe électrogène est faible par rapport au réseau classique. Cela signifie qu'il sera influencé par la charge supportée, ce qui entraîne des fluctuations dans la fréquence et la tension. La variation dans la charge est donc un paramètre important à étudier avant d'entamer la tâche de dimensionnement de système. Le groupe électrogène est généralement dimensionné pour une charge finale connectée prévue [44].

Il est essentiel que les règles de sécurité doivent être respectées, afin d'éviter d'endommager les personnes et les matériels. Une installation du groupe électrogène peut provoquer des situations dangereuses car le court-circuit dans un alternateur est plus de trois fois le courant nominal, il est souhaitable de placer la génératrice près de la charge pour éviter de longs câbles [45].

Le dimensionnement de générateur diesel doit porter à s'influencer le minimum sur l'environnement. Tous les impacts doivent être étudiés et tout genre de pollution doit être réduit au minimum pour préserver la terre. Les impacts qui traduisent un fonctionnement du groupe diesel sont : les émissions de gaz à effet de serre, les vibrations, le bruit, des perturbations sur le réseau électrique dans le cas de connexion avec ce dernier [44] [45].

Outre les impacts électriques, les problèmes proviennent principalement de moteur diesel lui-même. Puisque nous parlons des groupes diesels de génération d'énergie l'impact de l'environnement est trop important à étudier.

### **2.4 CONSTITUTION DU GROUPE DIESEL :**

Le groupe électrogène diesel est généralement composé d'un moteur diesel couplé à une génératrice synchrone. La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un

régulateur de vitesse. Le régulateur fonctionne en ajustant le flux du fuel dans l'objectif de garder la vitesse du moteur et la vitesse de la génératrice constante. Dans le cas de forts vents, l'embrayage découple la génératrice synchrone du moteur diesel. Cependant la machine fonctionne comme un compensateur synchrone et fournit de l'énergie réactive [46].

Les moteurs diesels sont les moteurs à combustion interne les plus efficaces. La vitesse de rotation d'un tel moteur dépend de la quantité de carburant injecté et de la charge appliquée au vilebrequin du moteur. Le moteur diesel est un système non linéaire, il présente des temps morts et des retards, ce qui rend difficile son contrôle. Les moteurs diesels sont munis d'un régulateur de vitesse : mécanique, électromécanique ou électronique. Celui-ci réalise le contrôle automatique de la vitesse du moteur diesel, en réglant l'injection de carburant en fonction de la charge. Il agit du mécanisme d'accélération, en fournissant le carburant sans variations brusques et répond en finesse aux variations de charge [5].

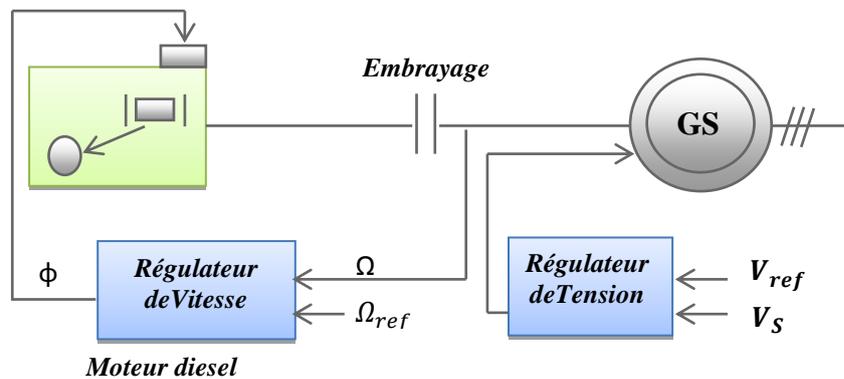


Figure 2.1 Le groupe diesel.

## 2.4.1 Le moteur diesel :

### 2.4.1.1 Définition :

L'élément principal dans la construction du groupe diesel est le moteur diesel. On peut se considérer que les premières automobiles furent créées en 1890 construit avec un moteur allemand de Daimler. Mais en 1892 que M. Rudolf Diesel invente le moteur diesel [45] .Il s'agit d'un moteur à allumage par compression ayant un rendement plus élevé que les machines à vapeur et les moteurs à essence à l'époque. Les premiers moteurs diesel rejoignent le monde de l'industrie plus précisément avec le marché d'automobile dans les années 1920.

La combustion dans les moteurs diesel s'effectue avec un mélange hétérogène composé d'air et de carburant diesel. Ce mélange est favorable à l'auto-inflammation et n'a donc pas besoin d'étincelle pour s'enflammer. Au début, le diesel est injecté dans le cylindre au moyen

d'une pompe à air mais avec les évolutions de la technologie, le carburant est injecté au moyen d'un système haut pression qui pulvérise le carburant [47]. La figure 2.2 montre les différents composants d'un moteur diesel.

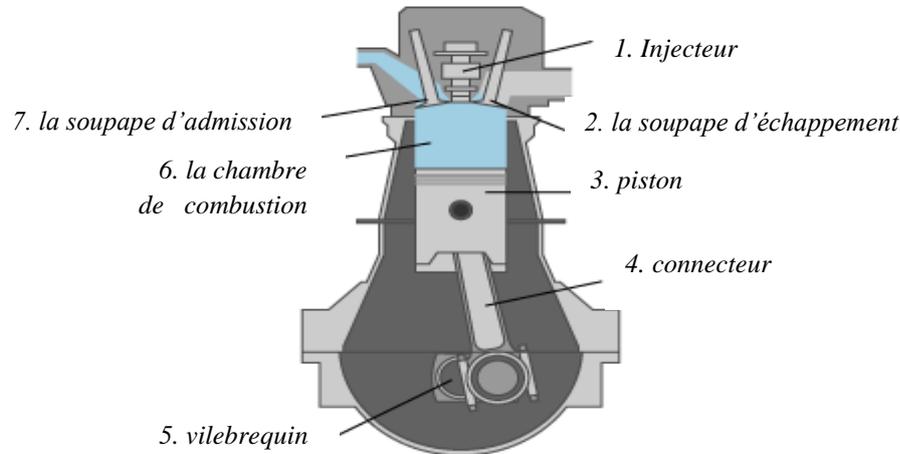


Figure 2.2 Les éléments du moteur diesel

#### 2.4.1.2 Modèle simplifié du moteur diesel :

Ce qui concerne le modèle fonctionnel de moteur diesel, plusieurs recherches ont pris l'avantage de le présenter à la plus simple image qui reflète les expériences et les mesures en exploitation du système. Le diagramme bloc d'un moteur diesel simplifié et celui du régulateur de vitesse respectivement illustré dans la figure 2.3.

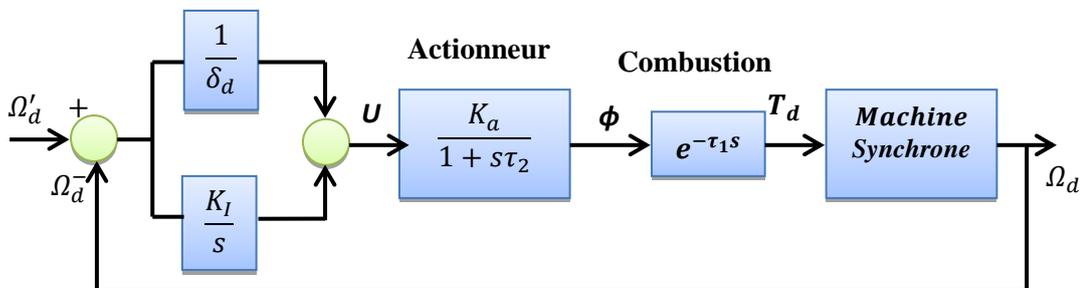


Figure 2.3 Bloc de modèle simplifié d'un moteur diesel avec un régulateur de vitesse

L'entrée de régulateur de vitesse est l'erreur de vitesse de rotation, la sortie est le signal de commande de l'actionneur. Les paramètres du régulateur de vitesse sont le statisme  $\delta_d$  et le facteur intégrateur  $K_I$  [47].

L'objectif de l'intégrateur est d'éliminer l'erreur statique de la vitesse. La dynamique de fonctionnement de l'actionneur est approchée par un modèle du premier ordre avec le gain  $K_a$  qui adapte la relation entre le couple et la consommation de carburant et une constante du

temps  $\tau_2$ , Cette constante de temps dépend de la température du carburant.

Les deux paramètres,  $K_d$  et  $\tau_2$  sont variables, mais leur variation est négligeable pour des intervalles de temps courts [5].

Le bloc de combustion inclut un retard qui représente le temps nécessaire pour que le moteur diesel réponde à une demande de modification du taux d'injection de carburant, ce temps mort  $\tau_1$  est le résultat de plusieurs cylindres qui ne sont pas tous dans la position permettant d'accepter plus de carburant à un instant donné. Le délai peut être exprimé comme étant le temps réel entre les arrivées consécutives des pistons au point d'injection plus approximativement eu quart de tour du vilebrequin. Ainsi, le délai peut être approché par :

$$\tau_1 = \frac{60.h}{2.n_c.\Omega_d} + \frac{60}{4\Omega_d} \quad (2.1)$$

Ou :

$h = 2$  ou  $4$  pour des moteurs à deux ou quatre temps,

$n_c$  : Le nombre de cylindres.

$\Omega_d$  : La vitesse de rotation en tours par minute. Le couple produit par le moteur diesel.

$T_d$  : La fonction du débit de carburant  $\phi$  [5].

### 2.4.2 La machine synchrone à aimant permanent :

L'utilisation de la machine synchrone à aimants permanents est connue depuis des dizaines d'années. Malgré les nombreuses caractéristiques du MSAP en comparaison avec les machines synchrones classiques, la MSAP auto-existée a trouvé peu d'applications pratiques. Toutefois les récents progrès de l'électronique de puissance et les stratégies de commande ont permis de régler la tension du MSAP pour différentes façons. Cela est traduit par un regain d'intérêt au niveau de fonctionnement comme génératrice, en particulier en régions éloignées en associations avec des moteurs diesels. La MSAP est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation, voir la figure 2.4.

#### 2.4.2.1 Le stator :

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui

constituent trois bobinages indépendants. Elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses. On distingue deux grandes catégories de bobinage, les bobinages dits réguliers, parmi lesquels on trouve les bobinages à pas diamétral, les bobinages à pas raccourcis, les bobinages répartis et les bobinages non réguliers, comme les bobinages à trous ou à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase [48].

#### 2.4.2.2 Le rotor :

Le rotor est l'élément le plus important dans la constitution de la machine, il est constitué d'un noyau de fer sur lequel sont disposés des aimants permanents qui servent à générer une excitation permanente. Les aimants permanents sont des matériaux magnétiques durs aimantés, ils conservent leur aimantation à la température d'utilisation ; leurs propriétés magnétiques sont déterminées tout d'abord par les propriétés intrinsèques des composés qui les constituent. Elles dépendent aussi fortement de la microstructure du matériau liée au procédé de fabrication. Les aimants permanents peuvent être montés en surface ou insérés dans le rotor. La perméabilité des aimants permanents étant voisine de la perméabilité de l'air, on peut considérer que cette machine possède un entrefer large et constant. Dans ces conditions, la machine peut être considérée à pôles lisses [48].

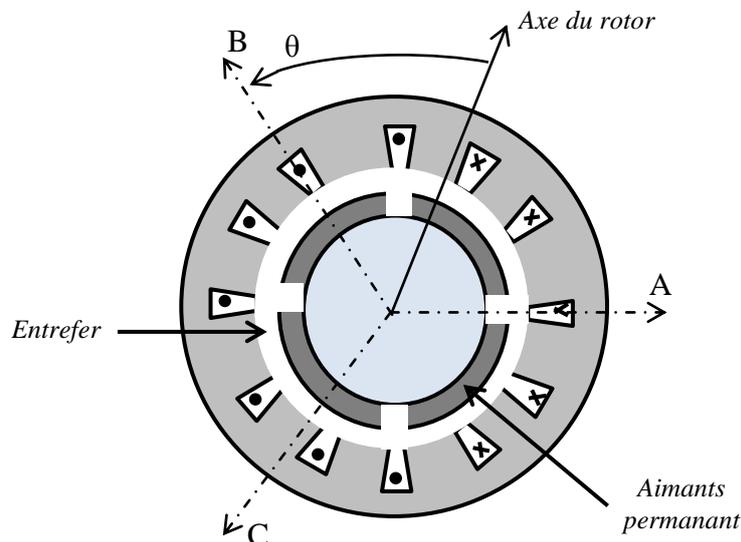


Figure 2.4 Structure de la machine synchrone à aimants permanents montés en surface

#### 2.4.2.3 Modèle simplifié de la MSAP :

La puissance mécanique qui sort du moteur diesel est convertie en énergie électrique par

un modèle simplifié de la génératrice synchrone. Les parties mécaniques et électriques de la machine sont modélisées dans le même bloc.

Le rotor de la machine synchrone est constitué d'un aimant permanent qui génère un champ magnétique tournant avec la rotation, les enroulements du stator sont parcourus par un courant alternatif [5].

La liaison qui relie entre la pulsation  $\omega_g$  du champ magnétique tournant et la vitesse de rotation est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_g}{p} \quad (2.2)$$

Avec  $\omega_g = 2.\pi.f$   $f$  : c'est la fréquence de courant alternatif.

L'enroulement statorique sera influencé par un champ magnétique tournant prend un emplacement à l'entrefer en créons une force électromotrice  $e(t)$  de valeur efficace  $E$  :

$$E = k.N.\phi.f \quad (2.3)$$

Avec

$k$  : Le coefficient de Kapp.

$N$  : Nombre de conducteurs d'une phase de la machine.

$\phi$  : Flux maximum en weber pour une phase.

La Figure 2.5 montre le modèle équivalent d'un enroulement de la génératrice synchrone

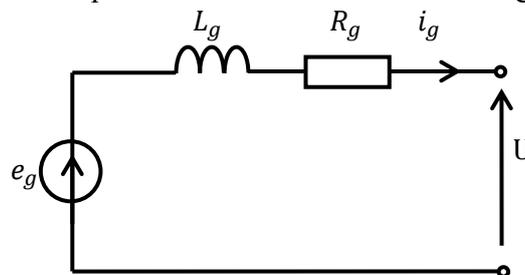


Figure 2.5 Modèle équivalent d'un enroulement

$e_g$  : F.é.m. à vide en volt.

$U$  : Tension aux bornes d'un enroulement de la machine en volt.

$R_g$  : Résistance de l'enroulement en ohm.

$L_g$  : L'inductance synchrone en henry

D'après le schéma de la Figure 2.5 on trouve selon la loi des mailles :

$$e_g = U + L_g \cdot \frac{di_g}{dt} + R_g \cdot i_g \quad (2.4)$$

Dans le même modèle simplifié l'équation de la partie mécanique sans l'apparition du frottement s'écrit comme suit :

$$J_{ds} \cdot \frac{d\Omega_s}{dt} = T_d - T_{em} \quad (2.5)$$

D'où

$J_{ds}$  : L'inertie totale de l'ensemble moteur diesel et générateur synchrone.

$\Omega_s$  : La vitesse de rotation.

$T_d$  : Le couple mécanique sur l'arbre.

$T_{em}$  : Le couple électromagnétique.

## 2.5 MODELISATION DU GROUPE ELECTROGENE DIESEL :

### 2.5.1 Modélisation du moteur diesel:

La modélisation du moteur diesel doit prendre en considération les pièces du moteur en mouvement, la puissance fournie  $P_i$  et la somme des puissances dissipées  $P_{diss}$ . Le moteur fonctionne à régime constant pour une charge donnée afin de maintenir constante la tension et la fréquence du courant fourni par l'alternateur. Le principe de la conversion d'énergie s'écrit alors comme suit [33] :

$$P_i - P_{diss} = 0 \quad (2.6)$$

La puissance fournie peut être représentée par l'expression suivante :

$$P_i = p_{ci} \cdot n_i \cdot m_f \quad (2.7)$$

Avec

$p_{ci}$  : Désigne le pouvoir calorifique inférieur du carburant.

$n_i$  : Le rendement indiqué du moteur

$m_f$  : Le débit de carburant injecté dans la chambre de combustion.

La puissance dissipée totale, inclut d'une part l'effet de frottement des pièces mécaniques en mouvement comme (bielles, pistons, vilebrequin) et d'autre part celui de la charge appliquée sur le moteur, celle de la génératrice. Elle peut être exprimée par la formule suivante :

$$P_{diss} = p_{mf} \cdot \frac{C_y}{4\pi} \cdot \omega + C_r \cdot \omega \quad (2.8)$$

$p_{mf}$  : La pression moyenne des pertes par frottement.

$C_y$  : La cylindrée totale du moteur.

$C_r$  : Le couple résistant dû à la charge appliquée.

La modélisation des frottements au niveau des différents éléments du moteur a fait l'objet de nombreux travaux qui aboutissent à des formes très variées. Vu la complexité pour traiter chaque élément à part, il a été préféré d'utiliser les formules d'évaluations globales de ces pertes [49]. La formule la plus précise qui représente la variation de la puissance de frottement en fonction du régime et de la pression d'air à l'admission du moteur s'écrit comme suit :

$$P_{mf} = (1 + \omega \cdot S_{eng} \cdot \left( K_{f1} + K_{f2} \cdot \frac{P_{in}}{P_a} \right) + K_{f3} \omega^2) \cdot P_a \cdot \frac{C_y}{4\pi} \cdot \omega \quad (2.9)$$

### 2.5.2 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

La modélisation de la MSAP dans le repère diphasé est déjà très utilisée pour établir des modèles compacts et adaptés à la synthèse des lois de la commande. La spécificité de la transformation permettant le passage du modèle triphasé classique à un modèle diphasé implique différentes structures des modèles.

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimant permanent est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à un moteur diesel. Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimant permanent doit obéir à certaines hypothèses essentielles simplificatrices :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la *FMM* créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température

La modélisation mathématique de la MSAP est illustrée dans l'ANNEXE 2.

### 2.6 CONTROLE DE TENSION ET DE FREQUENCE POUR LE GD :

Les groupes électrogènes ont été utilisés pour la production d'électricité pendant un siècle.

Ils peuvent être utilisés connecter directement au réseau ou bien dans un mode autonome. Dans un système dans lequel les générateurs sont directement reliés au réseau interconnecté, la vitesse des générateurs est fixée par la fréquence du réseau et la tension du système est relativement constante. Tandis que, dans un système autonome, la tension aux bornes tend à varier avec le changement de charge. Ce changement peut élever la puissance électrique générés une affectation de l'état de fonctionnement du système en particulier celles qui contient des petites capacités [45].

Pour maintenir un fonctionnement idéal des charges connectées, il est nécessaire de maintenir la tension et la fréquence constante en toutes circonstances. Pour la génératrice synchrone, un régulateur automatique de tension est utilisé afin de contrôler la tension aux bornes du générateur. Toutefois, pour une machine à aimant permanent plusieurs méthodes sont appliquées pour vérifier la même condition [50].

Généralement l'intégration de l'électronique de puissance dans le système sert à régler le contrôle de tension et de fréquence. Dans [51] une solution est présentée pour la régulation de la tension dans un système électrogène, un convertisseur DC/DC est introduit comme une étape de conversion dans le circuit intermédiaire (figure 2.6) pour garder la tension constante. Le système de conversion doit être capable d'absorber les surtensions transitoires et faire la compensation des chutes de tensions.

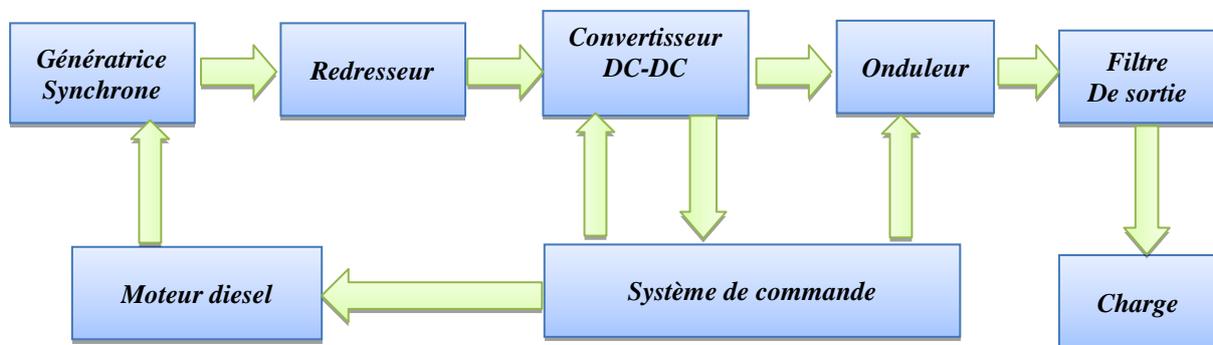


Figure 2.6 Bloc diagramme d'un générateur diesel avec un convertisseur DC/DC

Le même convertisseur doit présenter deux circuits, l'un de puissance et l'autre de commande. La section de circuit de puissance est constituée de plusieurs éléments de puissances à semi-conducteurs qui fonctionnent comme des interrupteurs statiques. La figure 2.7 montre sa configuration pendant une étape de commutation ; sa tâche principale est faire convertir la tension d'entrée à un niveau de tension contrôlée. L'interrupteur S est un dispositif de commutation commandé, il pourrait à n'importe quel moment être commandé en ouverture ou bien en fermeture à l'aide de circuit de commande qui fournit des signaux de

commutations.

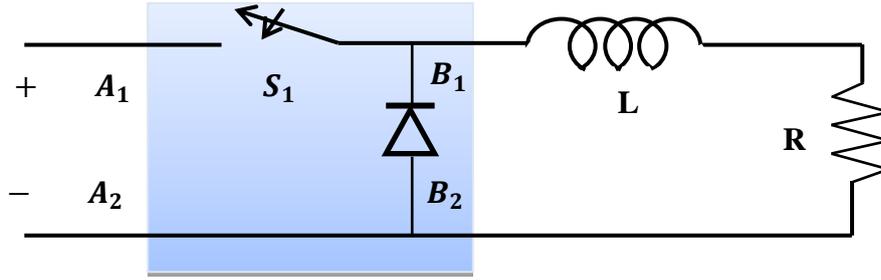


Figure 2.7 Le circuit de conversion

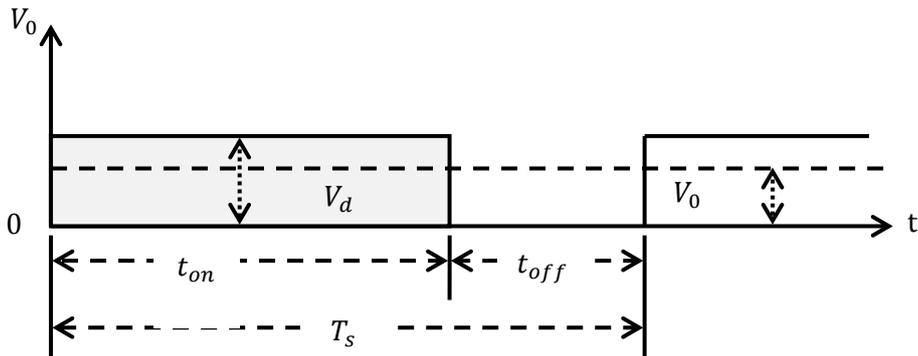


Figure 2.8 Les ondes de tensions générées par un circuit de commande

La figure 2.8 montre la forme d'onde de la tension aux bornes de sortie B1-B2 du convertisseur DC/DC. Il s'agit d'un train d'impulsions rectangulaires à durée défini, cette tension est constituée d'une composante continue et une autre alternative. La composante alternative est l'ondulation de la tension. L'inductance L absorbe la tension d'ondulation de manière à présenter la composante continue à la charge R. La fréquence d'ondulation est la même la fréquence de commutation de convertisseur DC/DC. Avec une inductance suffisamment importante et une fréquence de commutation élevée, la composante d'ondulation de la tension de sortie peut être négligeable. La tension de sortie moyenne ne peut être calculée qu'en fonction du rapport cyclique de commutation :

$$V_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} V_0(t) dt = \frac{1}{T_s} \left( \int_0^{t_{on}} V_d(t) dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T_s} V_d = DV_d \quad (2.10)$$

Par conséquent, le rapport de conversion du convertisseur de tension DC-DC, exprimé comme le rapport de la sortie de tension d'entrée :

$$a = \frac{V_0}{V_d} = D \quad (2.11)$$

Le rapport cyclique peut être modifié selon le changement de temps de commutation de l'interrupteur. Il est possible de faire varier le rapport de conversion de tension en fonction de besoin. Avec un tel convertisseur DC/DC, une tension constante peut être obtenue même dans le cas des variations de tension d'entrée. Dans [50]McCormick s'intéresse à appliquer une méthode basée sur la logique floue pour le contrôle de la tension et de la fréquence d'un générateur diesel.

## 2.7 SIMULATION DU GROUPE ELECTROGENE :

Le modèle du GD est donné dans la Figure 2.9. Il est validé par simulation pour assurer le bon fonctionnement des régulateurs de tension et de vitesse. Les paramètres du modèle sont les mêmes qui sont donnés dans L'ANNEXE 3. Dans cette configuration le système fourni de l'énergie électrique à l'aide d'un groupe électrogène constitué d'un moteur diesel et une génératrice synchrone à aimant permanent d'une puissance apparente de 300kVA, ce système est connecté à une charge principale de 150kW.

Le temps de simulation est de 10s avec une période d'échantillonnage de 1ms.

La charge primaire étant 50kW jusqu'à  $t=3s$ , à cet instant on ajoute une autre charge pour voir une charge de 100kW et à  $t=6s$  une totalité de charge est atteindre les 150kW. (Figure 2.10)

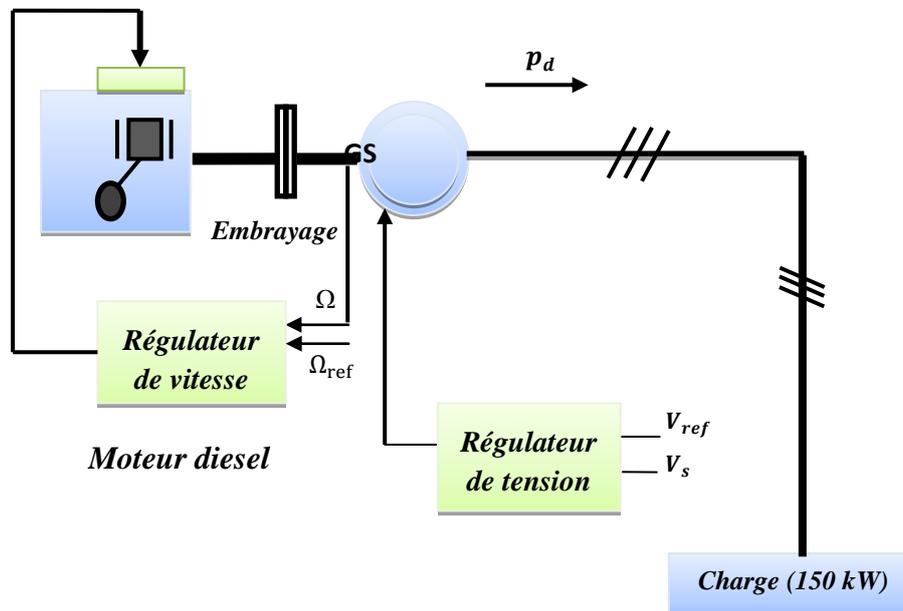


Figure 2.9 Schéma de simulation du générateur diesel avec la charge.

Les résultats de simulation sont montrés dans les figures ci-dessous.

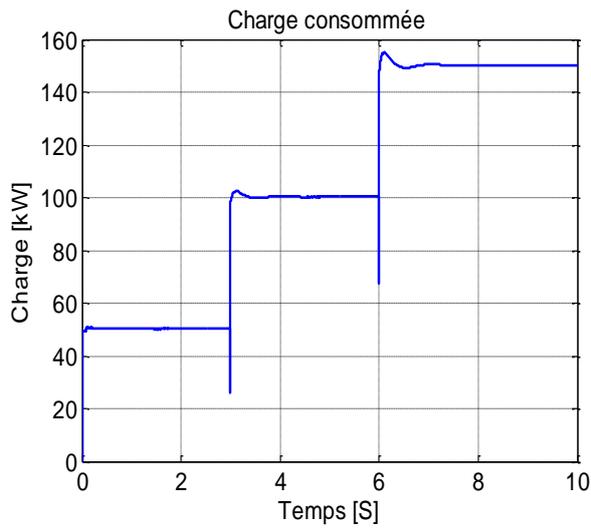


Figure 2.10 La charge

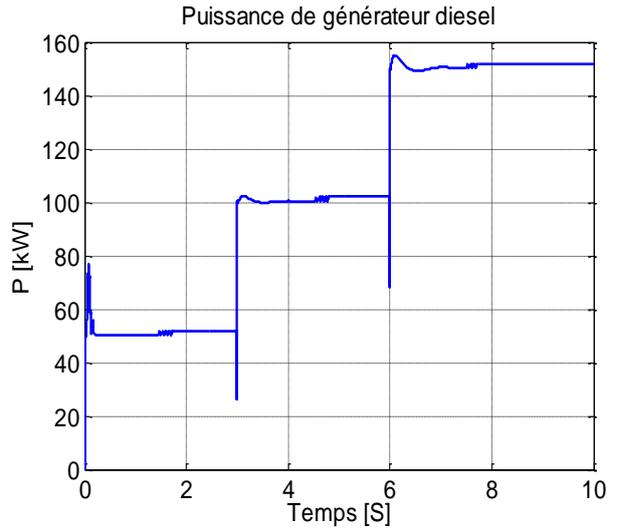


Figure 2.11 La puissance générée par le GD

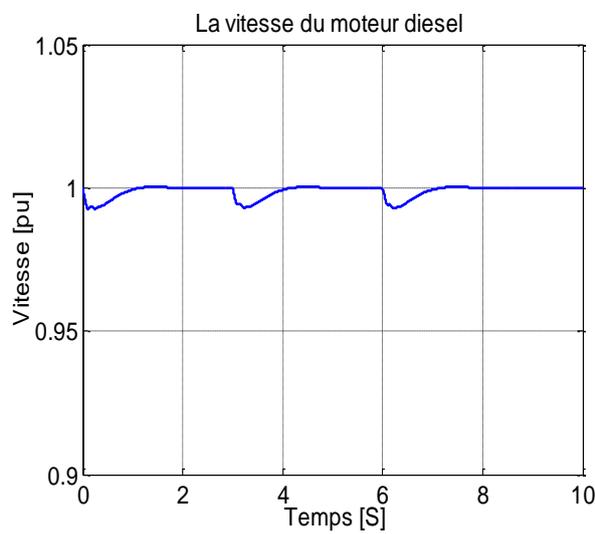


Figure 2.12 La vitesse du moteur diesel

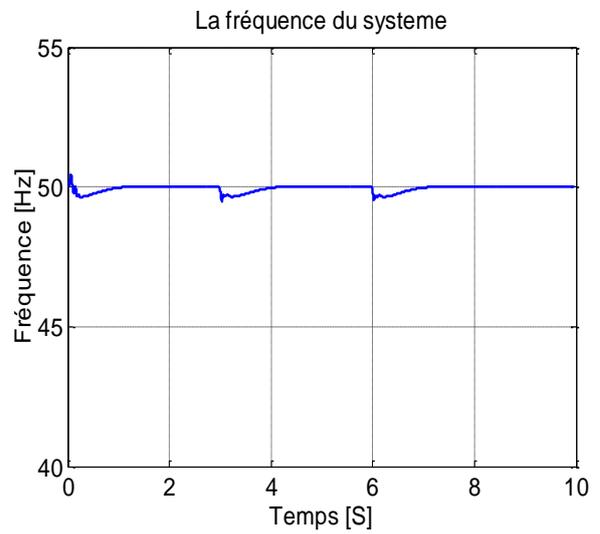


Figure 2.13 La fréquence du système

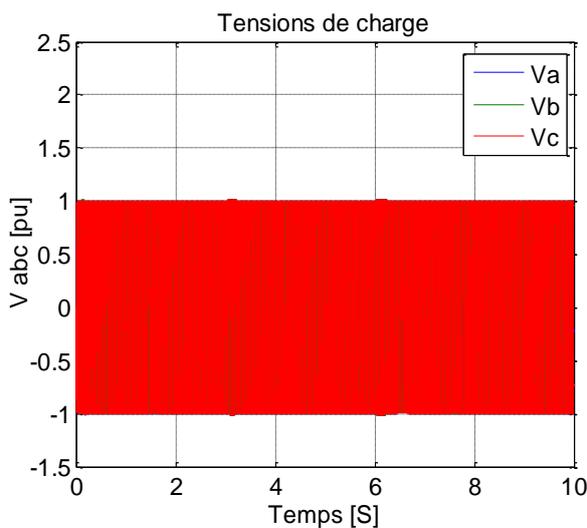


Figure 2.14 Les tensions de charge

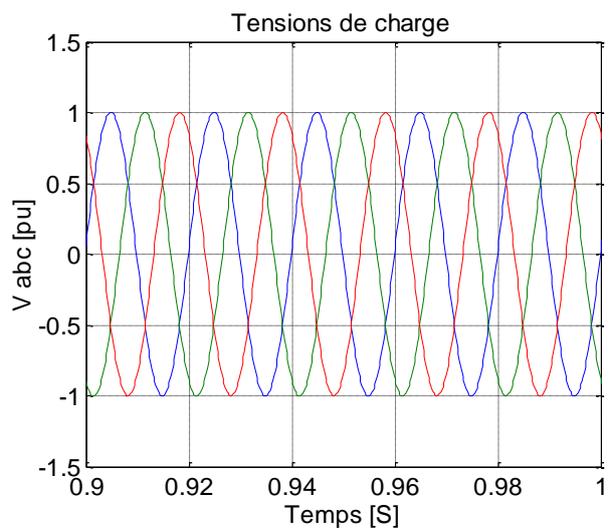


Figure 2.15 Zoom des tensions de charge

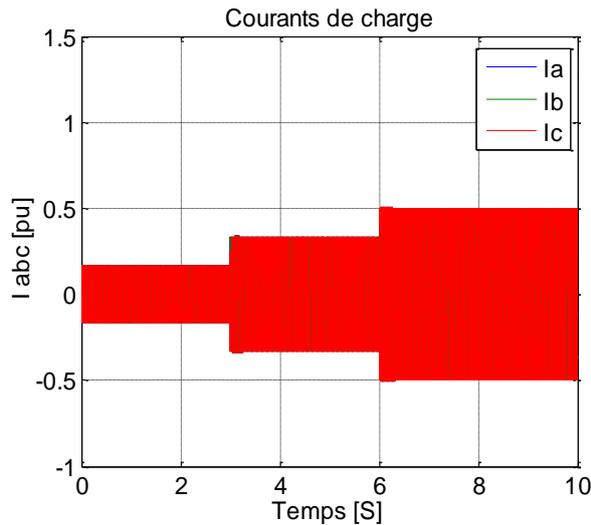


Figure 2.16 Les courants de charge

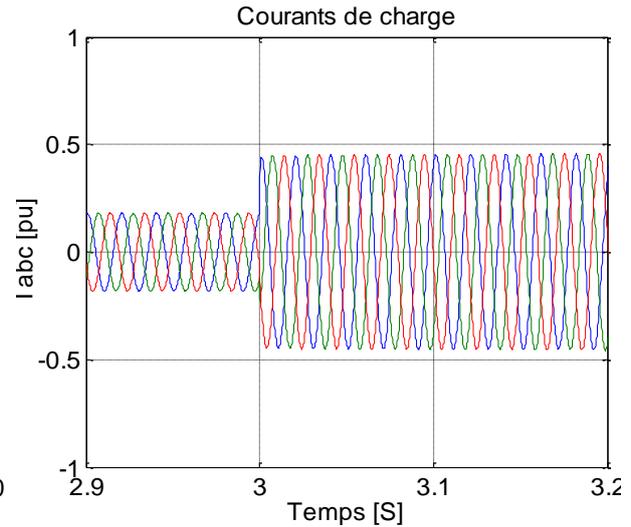


Figure 2.17 Zoom des courants de charge

D'après les résultats de simulation, on remarque que le moteur tourne à une vitesse presque constante (figure 2.12), avec desquelques fluctuations dans sa forme quand la charge demandée dans le système est variée (figure 2.10). ce qui est bien montré sur la (figure 2.13) où la fréquence reste autour 50Hz grâce au régulateur de vitesse.

La puissance générée par le groupe diesel suit parfaitement la variation de la charge demandée, ce qui traduit le bon fonctionnement du groupe diesel au niveau de la génération de l'énergie (figure 2.11).

Les figures 2.14 montrent que le régulateur de la tension joue son rôle important, puisque les formes de la tension et des courants (figure 2.14 à la figure 2.16) gardent des formes sinusoïdales.

## 2.8 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, avons présenté la constitution du groupe électrogène, où nous avons défini les différents éléments qui le constituent, avec une brève présentation de leur fonctionnement à vitesse fixe et variable en utilisant une machine synchrone à aimant permanent. La deuxième partie était consacrée pour la modélisation du générateur diesel, nous avons pu voir que cette tâche est assez importante pour l'étude de la simulation du comportement de système, les résultats obtenus montre le bon fonctionnement du groupe diesel, cependant le problème qui apparait par l'utilisation des groupes diesel est les émissions des gaz à effet de serre.

# **CHAPITRE 3**

**MODELISATION D'UNE CHAINE DE  
CONVERSION EOLIENNE AVEC MACHINE  
ASYNCHRONE AUTO EXCITE**

### 3.1 INTRODUCTION :

Depuis l'antiquité les hommes ont exploités l'énergie éolienne sur différentes formes et pour plusieurs applications. Après l'utilisation de moulin à vent la technologie des capteurs éoliens n'a cessé à se développer. Elle a connu un essor fort d'exploitation ses dernières années. Cependant la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été consacrés à la recherche et au développement des éoliennes [52]. L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. En 1997 la puissance mondiale générée par les éoliennes a touché les 7GW, ce qui est passé à 121GW en 2008 [53] et environ les 576MW fin 2011 pour les petites éoliennes installées dans le monde entier [54]. Selon les prévisions la capacité éolienne installée dans le monde sera à 273GW fin 2013.

Pour notre pays, l'Algérie s'engage sur la voie des énergies renouvelables afin de trouver des solutions globales au niveau de problématiques concernant la préservation de ressources énergétiques d'origine fossiles. Un programme algérien prévoit dans un premier temps l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10MW. Aussi deux fermes éoliennes de 20MW chacune devraient être réalisées entre 2014 et 2015. Cependant des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030[55].

La Figure 2.1 montre une carte annuelle pour une vitesse moyenne du vent de 10m/s sur tout le territoire algérien.

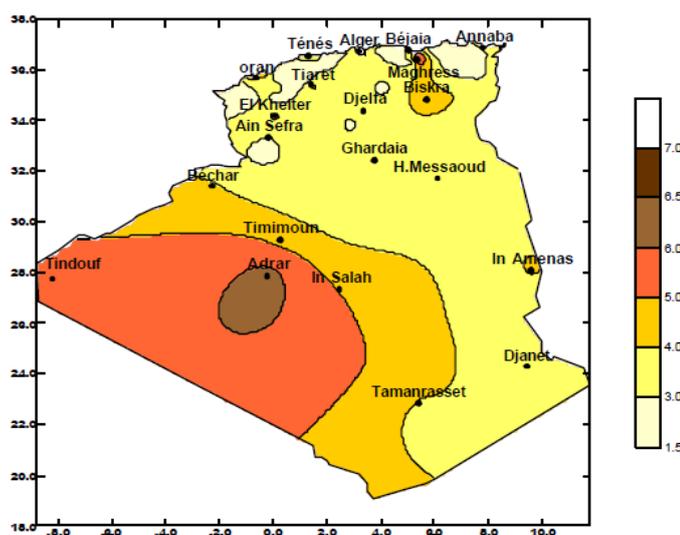


Figure 3.1 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s)

La vitesse du vent, le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevée qu'au nord, plus particulièrement les sud-ouest avec des vitesses supérieurs à 4m/s, dépassant la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Pour le nord la vitesse est peu élevée avec l'existence de micro climats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, ainsi Biskra au sud. Mais les saisons marquent aussi des différences entre les régions, et contrairement à ce qu'on pourrait croire, ce n'est pas en hiver qu'il y a le plus de vent, mais plutôt au printemps, sauf pour Tiaret où la vitesse du vent est faible plutôt en été. Ce qui est intéressant de constater, c'est que le vent est à peu près stable tout au long de l'année vers Annaba, Biskra et Adrar. Cela a son importance lorsqu'il s'agit de placer un système de conversion d'énergie éolienne [56].

Dans ce chapitre on va présenter une étude détaillée sur l'énergie les différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques, ainsi que les différents types de génératrices utilisées dans l'éolien ont été présentés, par la suite, nous présentons quelques résultats de simulation obtenus lors de l'étude des comportements du générateur asynchrone en mode isolé du réseau.

### **3.2 AVANTAGES ET INCONVENANTS DE L'ENERGIE EOLIENNE :**

#### **3.2.1 Avantage :**

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.

#### **3.2.2 Inconvénients:**

- Le vent peut parfois souffler à des intensités irrégulières.
- Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région.
- La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie.

### 3.3 GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS :

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions [57].

En général un système éolien ou bien un aérogénérateur est défini comme un système composé de plusieurs éléments aptes à transformer les variations de la densité et de la pression de l'air comme étant fluide en mouvement en énergie mécanique puis en énergie électrique [58].

#### 3.3.1 Classement d'éolienne selon l'orientation de leur axe de rotation :

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

##### 3.3.1.1 Eoliennes à axe vertical :

Parmi les premières structures développées afin de produire de l'énergie électrique sont les éoliennes à axe verticale. Elles possèdent l'avantage d'avoir des organes de commande et une accessibilité plus simple par la situation de générateur au niveau de sol. Elles peuvent également s'intégrer à l'architecture des bâtiments sans aucune complexité. Ses utilités s'adressent aux faibles vitesses du vent et donc pour des petites puissances. Par contre elles ne se conviennent pas autour de la production d'énergie aux grandes puissances.

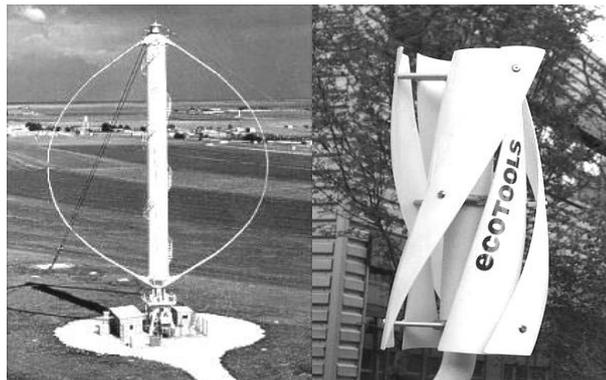


Figure 3.2 Différentes technologies d'éoliennes à axe vertical [14]

La figure 3.2.a montrent un type particulier de turbine éolienne à un axe verticale avec un rotor Darrieus fonctionne grâce à la portance, se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence [59]. Dans la Figure 3.2.b on trouve le rotor de Savonius basé sur le principe de la traînée différentielle. Les forces exercées par le vent sur chacune des faces d'un corps creux

sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble. Ce type d'éoliennes connaît des avantages remarquables au niveau de faible encombrement de la structure générale. Il démarre à des faibles vitesses du vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus, en parallèle le système construit est moins bruyant avec une suppression des contraintes sur la vitesse et la direction du vent. L'inconvénient majeur des unités englobe une diminution de rendement et une masse non négligeable. En général les éoliennes à axe vertical, restent toutefois marginales et peu utilisées à cause de présence d'un capteur d'énergie près du sol exposé aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité ; Elles sont de plus reliées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent.

### 3.3.1.2 Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales, le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien voir la Figure 3.3. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité [57]. Dans la littérature, les principales éoliennes étudiées sont à axe horizontal et tripales [1] [60] et c'est bien ce type d'éoliennes qui sera étudié dans ce chapitre.

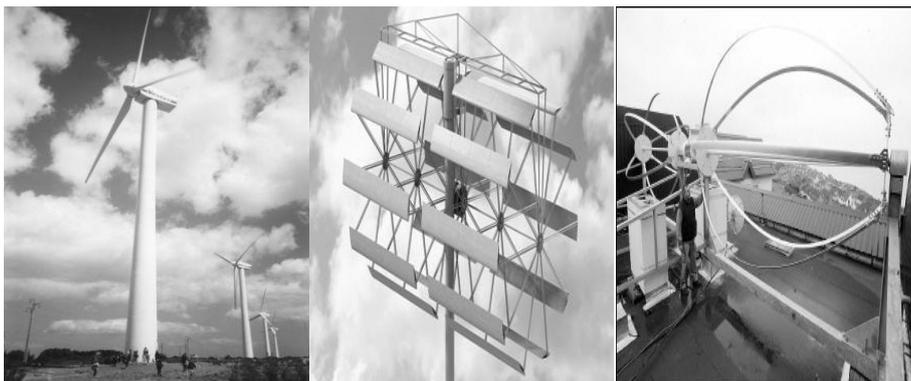


Figure 3.3 Différentes technologies d'éoliennes à axe horizontal

### 3.3.2 Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation :

Les éoliennes peuvent être aussi classées selon leur vitesse de rotation. Celle-ci peut être fixe ou variable. Les premières éoliennes implantées sont des éoliennes à vitesse constante

utilisant des génératrices asynchrones liées directement au réseau et c'est la fréquence du réseau qui impose la vitesse de rotation de la machine. Cette technologie est moins chère et utilise un système électrique simple ne nécessitant pas un système électronique de commande. Contrairement à cette technologie et avec le développement de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable utilisent des convertisseurs statiques pour établir une séparation complète entre la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de l'éolienne qui sera adaptée à la vitesse du vent, afin d'optimiser la puissance fournie au réseau ou bien fournie à une charge dans une installation autonome [61].

### 3.3.3 Etat de l'art sur le système éolien :

Plusieurs travaux de recherches ont été élaborés afin de comprendre le bon fonctionnement d'une éolienne. Ce qui concerne la conception et le design les études sont nombreuses [62] [63], dans [64] *J.Peter et al* présentent une étude complète pour un dimensionnement de tous les composants d'une éolienne moderne décrivant les conditions pour la mettre en marche. Dans [65] *Ryan T. Cowgill et al* présentent plusieurs méthodes de conception du rotor de l'éolienne. Le contrôle de la vitesse du rotor est aussi un paramètre très important dans l'étude de système, dans [66] un système de commande d'une éolienne à vitesse variable est présenté par les auteurs, afin d'avoir un maximum de puissance délivrée par la turbine dans différentes conditions et régions. Le même concept est montré par *Abdin et Ezzeldin* dans [67] pour une étude d'une génératrice asynchrone entraînée par une turbine à axe horizontal associée par des condensateurs afin de régler la tension. D'autres méthodes basées sur l'intelligence artificielle sont appliquées pour manipuler la même tâche, celle de réseaux de neurone en [68] et de la logique floue en [69]. Les paramètres de la modélisation et l'optimisation de système éolien a aussi pris la base de plusieurs recherches dans le monde entier, son état de l'art est présenté dans le paragraphe de modélisation.

## 3.4 LES PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN SYSTEME EOLIEN :

On s'intéressera dans ce qui suit qu'aux éoliennes à axe horizontal. Une éolienne "classique" est généralement constituée de quatre éléments principaux :

### 3.4.1 La turbine :

Représente l'outil principal pour la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est constituée de :

- *Mat* : Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le

plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [57].

- *Nacelle* : C'est une carcasse qui regroupe plusieurs éléments (générateur, arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de refroidissement, système de control.)
- *Rotor* : Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. prend en charge l'emplacement de la machine génératrice qui peut y être soit synchrone ou asynchrone.

### 3.4.2 Le système électromécanique :

Il se trouve dans la nacelle, un outil de transformation d'énergie mécanique transmise par la turbine en énergie électrique, il regroupe une génératrice électrique avec ses détails, plus le système de commande en cas de besoin, avec les outils d'électronique de puissance.

### 3.4.3 Le système d'interconnexion :

C'est le système qui nous permet de voir la relation entre le système producteur de l'énergie électrique et les consommateurs d'électricité. C'est un système simple il contient des câbles en cas d'une énergie mécanique stable, ou bien il sera composé par des redresseurs et des onduleurs en cas d'énergie mécanique instable.

### 3.4.4 Le système de contrôle :

Utile pour les éoliens d'une grande puissance, il comporte un dispositif qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation et essaye aussi de la mettre fonctionner à des puissances maximales. En cas de défaillance le système arrête automatiquement l'éolienne [61].

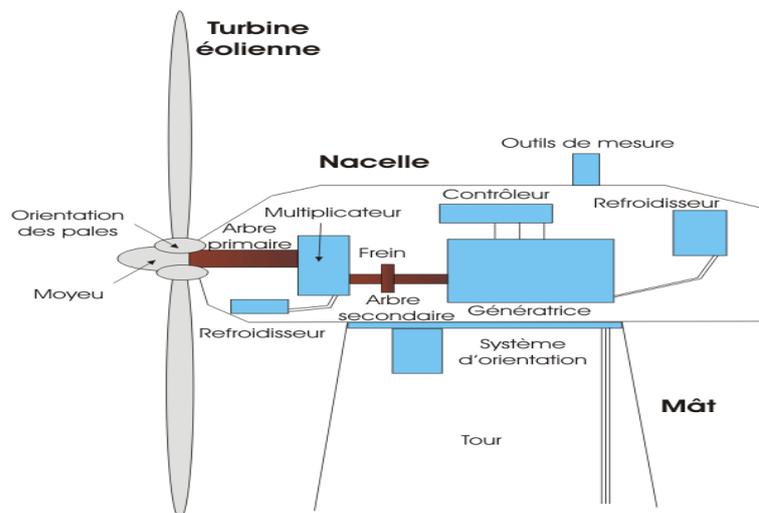


Figure 3.4 Une éolienne à axe horizontal

### 3.5 GENERATEURS :

Actuellement la production de l'électricité est l'application la plus fréquente des turbines éoliennes. Et donc l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Différents types de machines électriques peuvent être utilisées pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de la machine pour chaque application.

En général la génératrice asynchrone à cage d'écureuil occupe la grande partie des installations des éoliennes avec ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs la rend appropriée pour l'utilisation en conversion éolienne [1]. On va entamer les différentes génératrices qui rentrent dans le mécanisme d'une conversion d'énergie par les turbines éoliennes, et par la suite on s'intéresse aux génératrices utilisées dans des petites installations orientées pour alimenter des sites isolés.

#### 3.5.1 La génératrice synchrone :

C'est une machine qui offre des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elle peut être utilisée en entraînement direct sur les voilures éoliennes. Le circuit d'excitation de son inducteur demande la présence du réseau et une fourniture d'une puissance réactive. Les sites isolés ne sont pas adaptés à ce type de génératrice qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante, c'est le cas du travail présenté en [70] par *H. Benalla et al* dans le cadre d'une étude de modélisation et de commande d'une machine synchrone à aimant permanent associée à une chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite taille pour les sites isolés ; un autre travail en [71] présente une modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance par l'utilisation aussi d'une MSAP, l'ajout des bagues et balais pour un système possédant un type de MSAP provient un entretien régulier. Par contre la possibilité de réglage de l'inducteur de cette machine offre un moyen supplémentaire d'ajustement du point de fonctionnement énergétique. L'électronique de puissance s'impose pour toutes les applications qui utilisent ce type de machine qui sont donc à vitesse variable [14].

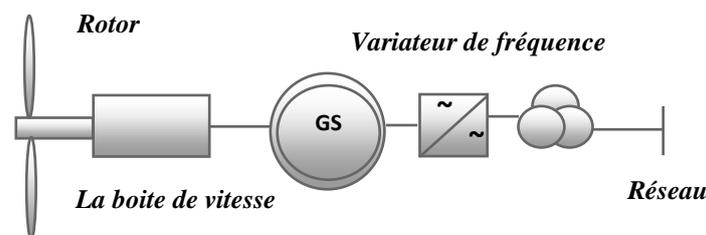


Figure 3.5 Système éolien basé sur la GS pour un fonctionnement à vitesse variable

### 3.5.2 La génératrice asynchrone :

Le faible coût et la standardisation de machine asynchrone qui nécessite pas une complexité d'installation a conduit à une très large domination de ce type de génératrices jusqu'à des puissances dépassant les mégawatts. Elle est souvent associée à une batterie de condensateurs et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau [2]. Elle est moins exigeante en termes d'entretien et présente un taux de défaillance très peu élevé. Dans l'aérogénérateur de dimension conséquente, la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

Dans la littérature plusieurs travaux de recherches ont été appliqués pour l'étude de la conversion d'énergie éolienne en utilisant la machine asynchrone comme génératrice. Dans [72] *K. Idjdarene* a étudié le contrôle de la tension à la sortie d'une génératrice asynchrone connectée à un convertisseur statique dans le cas d'alimentation d'un site isolé, aussi bien et dans [57] l'auteur présente l'ensemble des travaux effectués pour l'utilisation des machines asynchrones pour des systèmes éoliens.

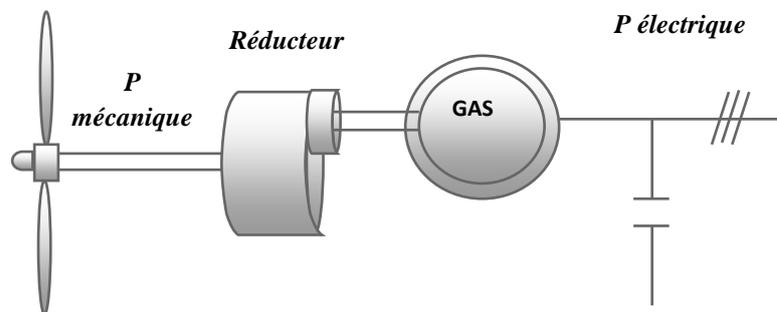


Figure 3.6 Système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage à vitesse constante

### 3.5.3 La génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) :

Pour des grandes puissances ils existent des générateurs asynchrones capable de fonctionner à vitesse réglable, les avantages qui les mise en faveur en comparaison avec des générateurs à vitesse fixe sont :[73]

- une réduction des contraintes mécaniques à cause d'inertie stockée dans la turbine, un phénomène qui crée une élasticité permet de réduire les pulsations du couple.
- une qualité d'alimentation améliorée à cause de la réduction de la pulsation du couple qui empêche à éliminer les variations de puissance.

- une efficacité du système ou la vitesse de la turbine est réglée en fonction de la vitesse du vent pour maximiser la puissance en sortie.
- une commande plus simple avec une simplicité de la construction du système, à voir que pour des vitesses du vent trop faible, l'angle d'inclinaison est généralement fixe et un contrôle de l'angle de tangage est effectué uniquement pour limiter la puissance de sortie.

La machine asynchrone à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone, c'est une solution à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation MADA à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse ; mais cette machine est un peu plus complexe que l'ancienne machine car elle nécessite un multiplicateur de vitesse [57]. Cette éolienne permet également de contrôler la puissance réactive et de contribuer ainsi à la tenue de la tension si nécessaire.

Dans [13] l'auteur présente une modélisation et un contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation pour les fortes puissances. Les résultats de l'étude favorisent l'utilisation de cette installation pour un mode de fonctionnement avec un redresseur et une batterie de stockage pour une énergie emmagasiné.

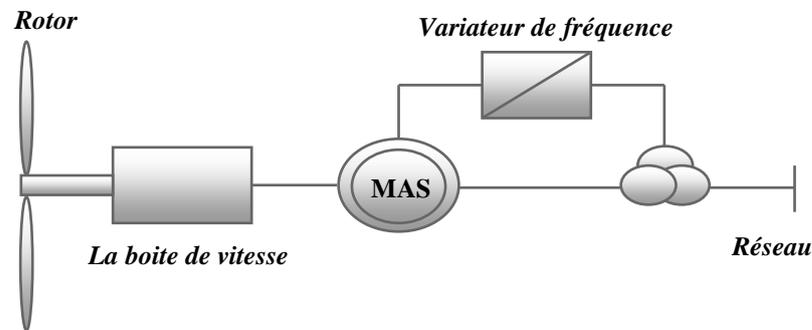


Figure 3.7 Système éolien basé sur la génératrice asynchrone GADA à vitesse variable

### 3.5.4 Une comparaison entre les différentes machines : [74]

| Type d'éolienne              | avantages   | inconvénients   |
|------------------------------|---|---|
| <b>MAS</b><br>à vitesse fixe | -Machine robuste.<br>-Faible cout<br>-Pas d'électronique de puissance | -Puissance extraite non optimisé.<br>-Maintenance de la boîte de vitesse.<br>-Pas de contrôle de l'énergie réactive.<br>-Magnétisation de la machine imposée par le réseau. |

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p><b>MADA</b><br/>à vitesse variable</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Fonctionnement à vitesse variable.</li> <li>-Puissance extraite optimisé</li> <li>-Electronique de puissance dimensionnée à 30 % de la puissance nominale.</li> <li>-Machine standard.</li> <li>-Connexion de la machine facile à gérer.</li> <li>-Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Maintenance de la boîte de vitesse.</li> <li>-Pris de l'électronique de puissance.</li> <li>-Contrôle et commande complexe.</li> <li>-Contact glissant bagues -balais</li> </ul>                               |
| <p><b>MSAP</b><br/>à vitesse variable</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Fonctionnement a vitesse variable sur toute la plage de vitesse.</li> <li>-Puissance extraite optimisé pour les vents faibles.</li> <li>-Connexion de la machine facile à gérer.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Pris d'électronique de puissance.</li> <li>-Machine spécifique.</li> <li>-Grand diamètre de machine.</li> <li>-Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.</li> </ul> |

Tableau III.1 Avantages et inconvénients de différentes éoliennes

### 3.6 MODELISATION DE LA CHAÎNE EOLIENNE :

Dans la littérature, plusieurs études ont été consacrées pour la modélisation de différents composants d'un système éolien pour une prévision de qualité de puissance générée. Les chercheurs qui prennent l'axe de recherche en relation avec l'énergie électrique ont tendance à simplifier les pièces aérodynamiques et mécaniques du système et soulignent généralement la description du générateur, contrairement aux chercheurs en mécanique, ces derniers négligent souvent les détails sur les performances du générateur.

Un modèle simple d'une éolienne de petite puissance a été présenté en [71], dans la même idée et pour comprendre les caractéristiques d'une éolienne non connectée à un réseau, les auteurs en [53] ont fait une analyse sur différentes méthodes de modélisation, la première traite un modèle théorique y compris une deuxième basée sur les données expérimentales. Une complexité de fonctionnement de l'éolienne a mis au point une étude présentée par *M. Jelavić et al* dans l'article [75], pour but d'identifier un modèle linéaire capable de donner une bonne description du comportement de l'éolienne.

Dans les revues scientifiques on trouve la modélisation et la simulation de plusieurs génératrices qui peuvent être entraînées par une turbine dans un système éolien, les articles [13][72] [76] [77] présentent une étude pour but de modéliser la génératrice asynchrone avec

la turbine. Cependant l'optimisation d'une machine synchrone est présentée par R. Bharanikumar et al dans [78] avec une utilisation d'algorithme MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Dans l'article [79] Molina M.G et al présentent une modélisation d'une chaîne éolienne qui contient une machine synchrone à aimant permanent et son influence sur le réseau. L'impact des éoliennes sur la stabilité du réseau est également traité. Dans [80] l'auteur décrit un modèle complet d'une éolienne connecter au réseau et simuler par matlab.

### 3.6.1 Modèle du vent:

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. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à une dimension. A noter que l'orientation du vent dans le plan horizontal n'a pas d'importance pour une voileure à axe vertical[81].

Le modèle comportemental du vent peut donc être simplifié considérablement. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V = f(t) \tag{3.1}$$

La vitesse du vent peut être modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V(t) = 8 + 0.2.\sin(0.1047.t) + 2.\sin(0.2665.t) + \sin(1.2930.t) + 0.2.\sin(3.6645.t) \tag{3.2}$$

La Figure 3.8 représente le vent simulé avec une vitesse moyenne de 8 m/s

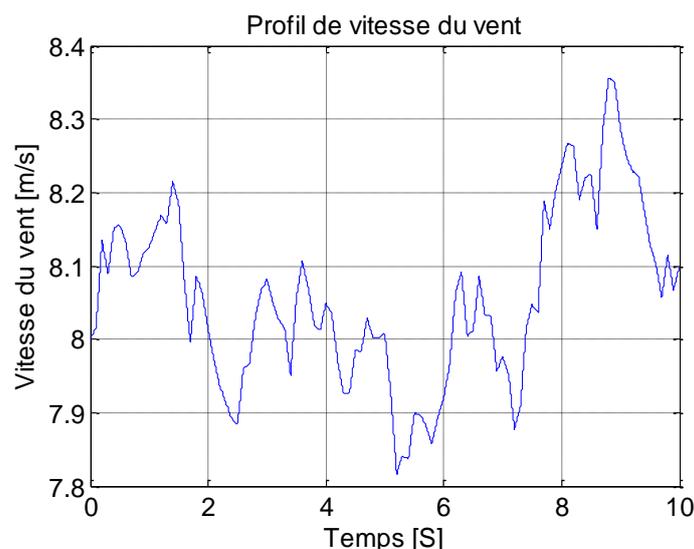


Figure 3.8 Simulation de profil de vitesse du vent

### 3.6.2 Choix de la machine génératrice pour une installation autonome :

Après avoir parlé des types d'aérogénérateurs qui existent on va s'orienter à étudier un type plus particulier celle de machine asynchrone à cage d'écureuil auto excitée. Ses génératrices rentrent dans la construction des éoliennes qui sont utilisées pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques de manière économique et durable, principalement en milieu rural. C'est une solution parfaite lorsque le raccordement au réseau est impossible. Dans ce cas la nécessité d'avoir un outil d'électronique de puissance est indispensable ce qui mis la présence d'un système de stockage ou bien un autre système producteur de l'énergie, le cas du système hybride, l'éolienne donc n'est pas complètement autonome.

Seul un dispositif basé sur une machine asynchrone auto-excitée par un banc de capacités directement connecté sur une charge permet d'obtenir un fonctionnement purement autonome. Le phénomène d'auto-excitation est en revanche difficile à maîtriser car les variations de charge influent directement sur les valeurs de la tension et la fréquence délivrées. De plus, un dispositif d'orientation des pales de l'éolienne est nécessaire afin de maintenir une vitesse de rotation et par conséquent une fréquence délivrée fixe[82]. Afin de déterminer les performances et les limites de fonctionnement de ce dispositif, un modèle de la machine est établi dans un repère diphasé.

### 3.6.3 Modélisation de la turbine :

#### 3.6.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine :

Le modèle que nous sommes en train de l'étudier se compose d'une turbine qui contient 3 pales orientables de longueur R.

- les trois pales sont considérées de conception identique ce qui permet de voir l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique.
- le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être négligé.
- la vitesse de la turbine étant faible et donc les pertes de frottement de la turbine sont négligeable par rapport aux pertes de génératrice.

#### 3.6.3.2 Modèle de turbine : [2] [14]

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la

vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. Dans notre cas on va prendre le moteur éolien à axe horizontal, le principe de la conversion éolienne a été établi par Betz, il suppose que les pales sont placées dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $V_2$  avec une masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales, la masse d'air est définie par :

$$m = \frac{\rho \cdot S (V_1 + V_2)}{2} \quad (3.3)$$

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

$$P_m = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (3.4)$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (3.4)

$$P_m = \frac{\rho \cdot S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (3.5)$$

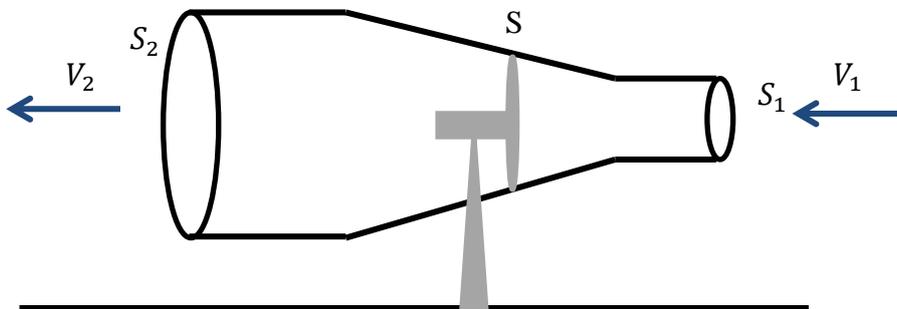


Figure 3.9 Tube de courant autour d'une éolienne.

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

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (3.6)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (3.7)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, on s'aperçoit que le ratio  $\frac{P_m}{P_{mt}}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de 0,59 (Figure 3.10).

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. (Figure 3.11)

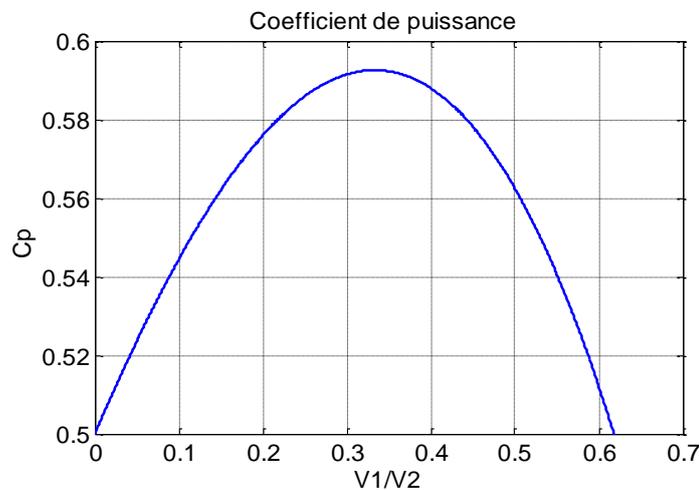


Figure 3.10 Coefficient de puissance

En combinant les équations (3.3), (3.6) et (3.7), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (3.8)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1} \quad (3.9)$$

$\Omega_1$  : Vitesse de rotation avant le multiplicateur.

$R$  : Rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse  $K$ , la puissance mécanique  $P_{mg}$  disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_2 \cdot R}{K \cdot V_1} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (3.10)$$

Avec  $\Omega_2$  : Vitesse de rotation après multiplicateur.

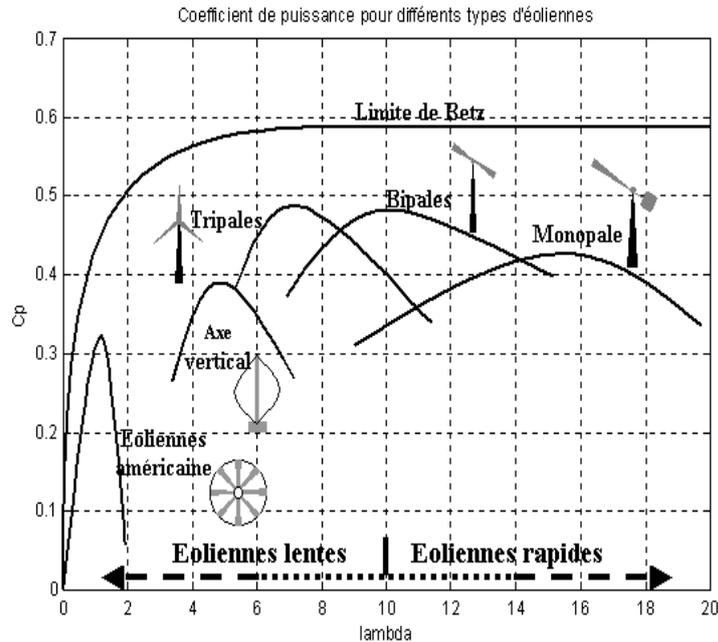


Figure 3.11 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Si on prend l'exemple d'un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de  $\lambda$  donnée appelée  $\lambda_{OPT}$  [83]. La vitesse de rotation optimale  $\Omega_{OPT}$  résultante est alors donnée par :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1} \cdot V \quad (3.11)$$

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale  $P_n$  à partir d'une vitesse de vent nominale  $v_n$ . Pour des vitesses de vents supérieures à  $v_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques, de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs de dimensionnement ;  $V_{min}$  la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et  $V_{max}$  la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être arrêtée pour ne pas subir de dégâts [2].

La figure 3.12 montre une caractéristique de puissance en fonction de vitesse du vent qui comporte quatre zones :

- La zone I, où aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse de démarrage  $V_{\min}$ .
- La zone II, lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliquée.
- La zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance  $P_{tu}$  fournie reste sensiblement égale à  $P_n$ .
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

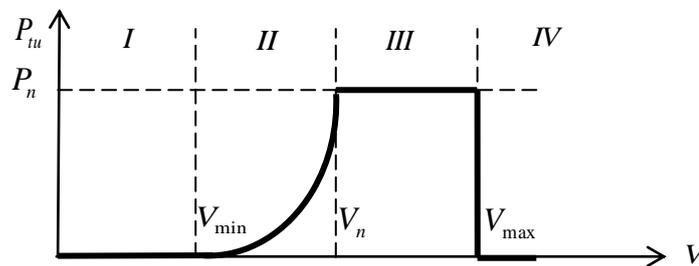


Figure 3.12 Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

### 3.6.4 Modèle de la génératrice asynchrone :

Pour une représentation parfaite du comportement de la génératrice asynchrone, il est nécessaire de faire la modéliser d'une façon correcte par un modèle assez précis comme le modèle déphasé bien détaillée dans L'ANNEXE 1.

### 3.6.5 Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage : [57]

Considérons le schéma équivalent simplifié ramené au stator d'une phase de la génératrice asynchrone de la Figure 3.13. La machine est entraînée à la vitesse de synchronisme rendant ainsi la résistance  $R'_r/g$  infinie. Le courant  $I$  dans l'inductance magnétisante est par conséquent équivalent au courant traversant le condensateur.

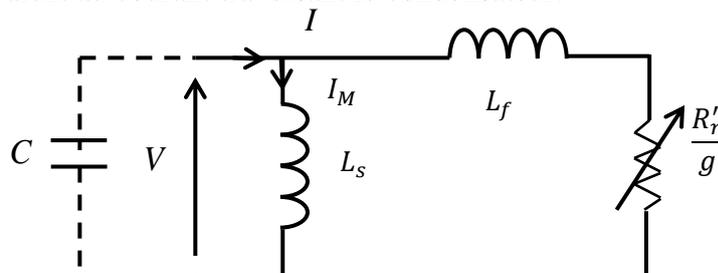


Figure 3.13 Schéma équivalent simplifié d'une phase de la MAS ramené au stator

Dans le cas où une charge purement résistive  $R$  est connectée au stator de la machine, le schéma équivalent par phase de l'ensemble machine - capacité d'auto-excitation - charge peut alors être modifié comme indiqué sur la Figure 3.14 (b)

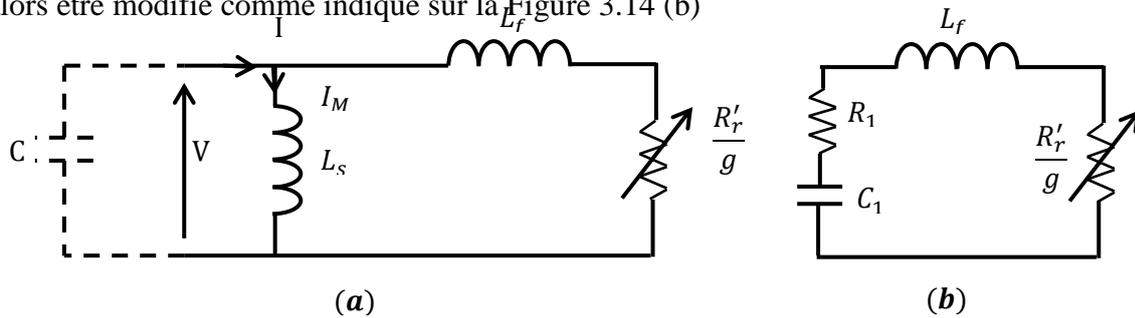


Figure 3.14 Transformation du schéma équivalent

$R_1$  et  $C_1$  peuvent être exprimés en fonction des éléments du schéma équivalent classique :

$$R_1 = \frac{R}{1 + \left[ R \left( C \cdot \omega_s - \frac{1}{L_s \cdot \omega_s} \right) \right]^2}, \quad C_1 = \frac{1 + \left[ R \left( C \cdot \omega_s - \frac{1}{L_s \cdot \omega_s} \right) \right]^2}{R^2 \left( C \cdot \omega_s - \frac{1}{L_s \cdot \omega_s} \right)} \quad (3.12)$$

L'auto-amorçage de la génératrice ne peut avoir lieu que si la puissance apparente qu'elle produit correspond à celle qu'elle absorbe. Pour la partie puissance réactive, on doit alors satisfaire l'égalité suivante :

$$L_f \cdot \omega_s - \frac{1}{C_1 \cdot \omega_s} = 0 \quad (3.13)$$

Soit :

$$F(\omega_s) = L_f = \frac{R^2 \cdot L_s \cdot (L_s \cdot C \cdot \omega_s^2 - 1)}{(L_s \cdot \omega_s)^2 + R^2 (L_s \cdot C \cdot \omega_s^2 - 1)^2} \quad (3.14)$$

Cette inductance  $L_f$  doit bien évidemment être positive, une condition nécessaire à l'amorçage

est donc

$$L_f \cdot C \cdot \omega_s^2 > 1 \quad (3.15)$$

Cette condition montre que la valeur minimum conduisant à l'auto-amorçage est fonction de l'inductance cyclique statorique ainsi que de la pulsation rotorique et du glissement. La caractéristique  $F(\omega_s)$  est représentée dans la Figure 3.15.

Si  $F(\omega_s)$  est toujours inférieure à  $L_f$  (courbe b), il n'y a pas d'amorçage possible. Dans le

cas contraire (courbe a), il existe deux pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  vérifiant l'équation(3.17). En pratique, seule  $\omega_1$  est intéressante car  $\omega_2$  correspond à un fonctionnement instable. Pour la partie puissance active, on doit satisfaire l'égalité suivante :

$$\frac{R_r'}{R} + R_1 = 0 \tag{3.16}$$

Soit :

$$g = -\frac{R_r'}{R} \left[ 1 + R^2 \left( C\omega_s - \frac{1}{M\omega_s} \right)^2 \right] = -G(\omega_s) \tag{3.17}$$

La caractéristique  $G(\omega_s)$  (Figure 3.16) montre que deux glissements  $g_1$  et  $g_2$  correspondent aux pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  déduites précédemment. On vérifie bien que la pulsation  $\omega_2$  conduit à un glissement trop élevé.

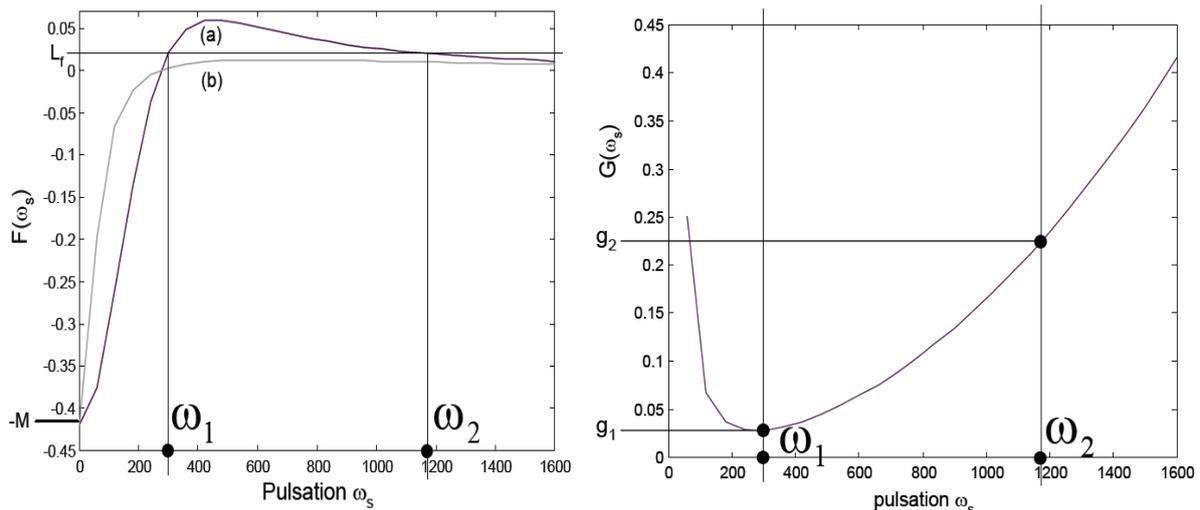


Figure 3.15 Caractéristique  $F(\omega_s)$  Figure 3.16 Caractéristique  $G(\omega_s)$

### 3.7 SIMULATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE ENTRAINEE PAR LA TURBINE CONNECTER A UNE CHARGE:

Dans cette partie on va présenter des tests de la chaîne de conversion éolienne sous le logiciel Matlab/Simulink, Le modèle de l'éolienne et de la génératrice asynchrone sont montré dans l'Annexe 3.

#### 3.7.1 Simulation de la vitesse du vent avec la turbine :

Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation de fonctionnement de turbine avec différentes vitesses de vent, dans le premier cas le vent été simulé pour une valeur fixe théorique. Et le deuxième cas, le vent comme une valeur réel .

**3.7.1.1 Vitesse du vent théorique :**

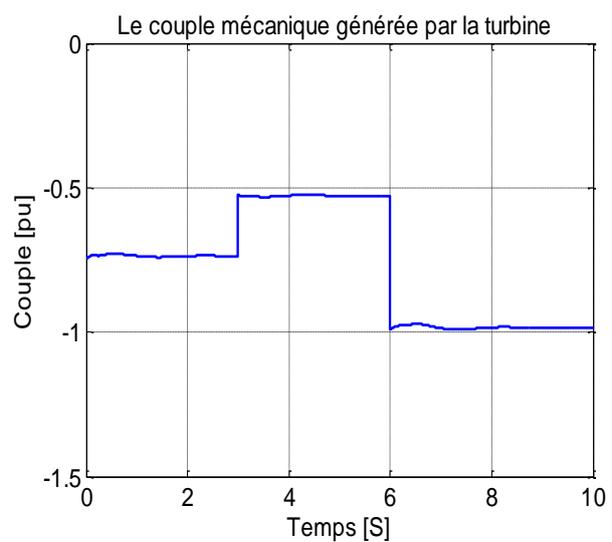
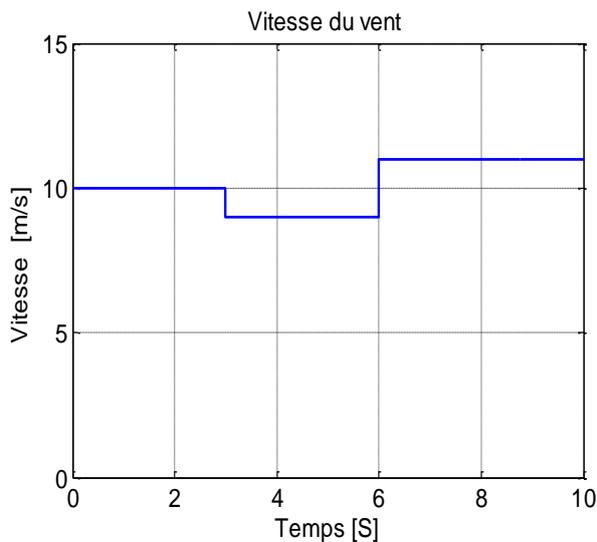


Figure 3.16 Vitesse du vent théorique Figure 3.17 Couple généré par la turbine

Les figures 3.16 et 3.17 montrent une simulation de la vitesse du vent qui varie entre 9m/s à 11m/s et son influence sur le couple généré par la turbine. On remarque que l'augmentation de la vitesse du vent résulte une augmentation du couple mécanique généré par la turbine.

**3.7.1.2 Vitesse du vent réel :**

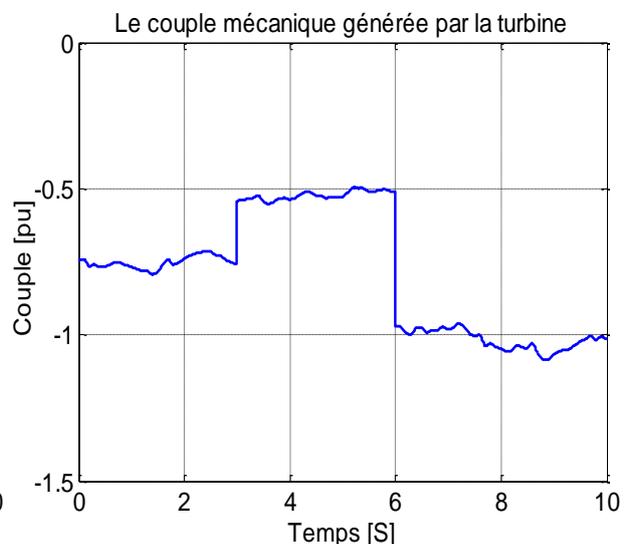
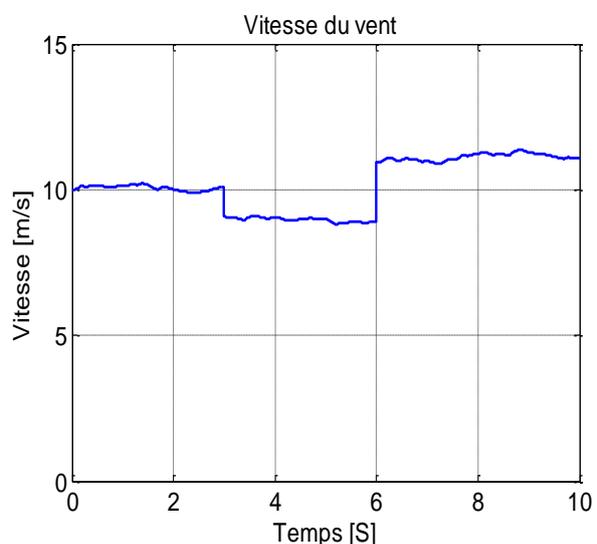


Figure 3.18 Vitesse du vent réel Figure 3.19 Couple généré par la turbine

Les figures 3.18 et 3.19 montrent une simulation de la vitesse du vent réel qui varie entre 9m/s à 11 m/s et son influence sur le couple généré par la turbine. On remarque que la variation dans la valeur du vitesse du vent instantané implique de variations dans la forme de couple mécanique généré par turbine mais avec des ondulations due aux perturbation du vent.

### 3.7.2 Simulation de turbine avec la MAS :

Dans notre configuration le système fourni de l'énergie électrique à l'aide d'un système éolien constitué par une turbine reliée à une génératrice asynchrone d'une puissance apparente 250kVA. Ce système alimente une charge de 100kW (figure 3.20). Le même système fonctionne sur une tension de 380V et une fréquence de 50Hz. Le temps de simulation est de 10s avec une période d'échantillonnage de 1ms. Les résultats de simulation sont montrés dans les figures ci-dessous.

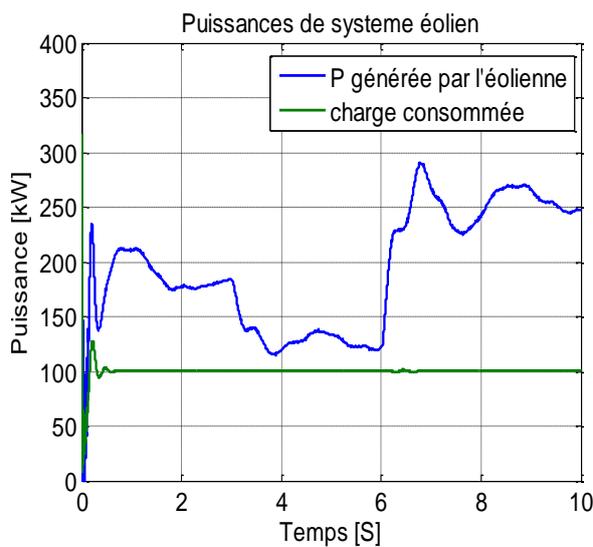


Figure 3.20 Puissances de système éolien

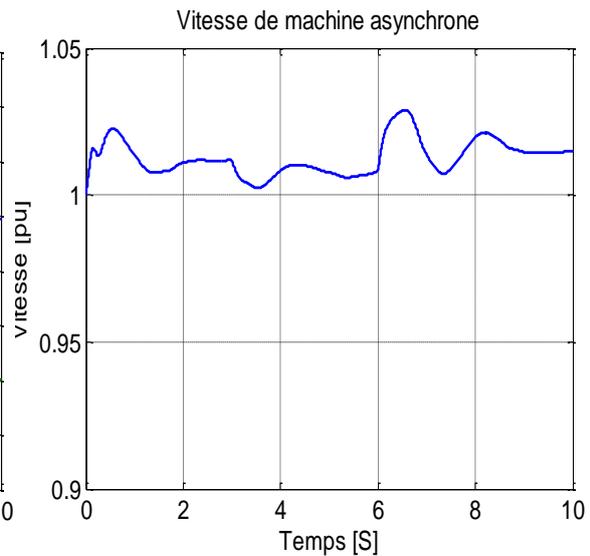


Figure 3.21 Vitesse de la MAS

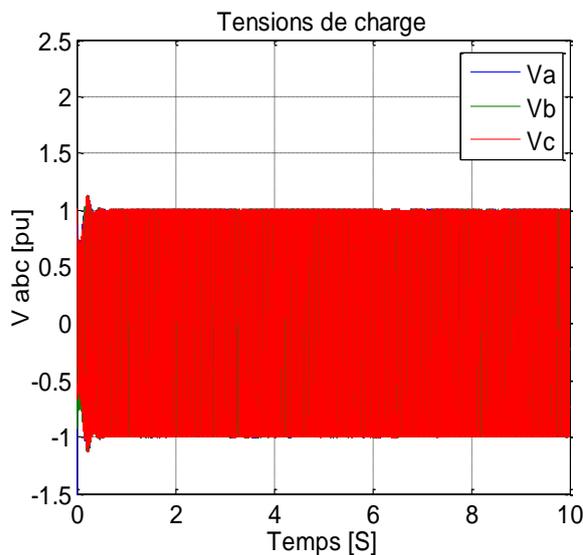


Figure 3.22 Les tensions de charge

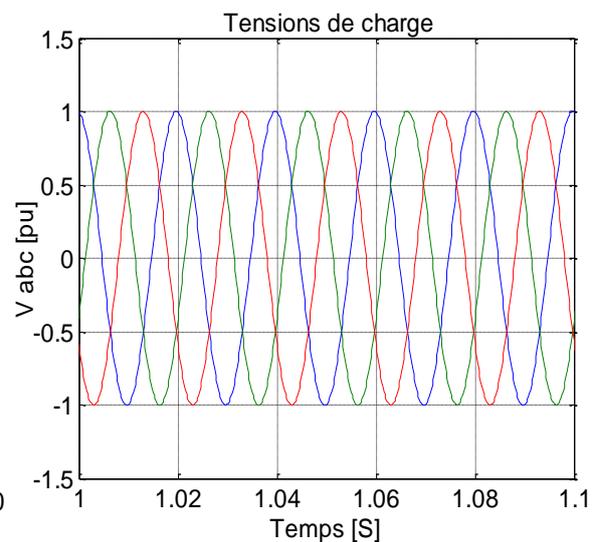


Figure 3.23 Zoom des tensions de charge

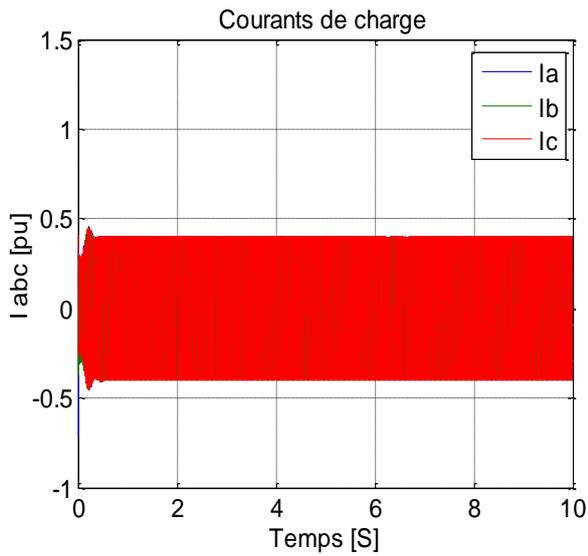


Figure 3.24 Les courants de charge

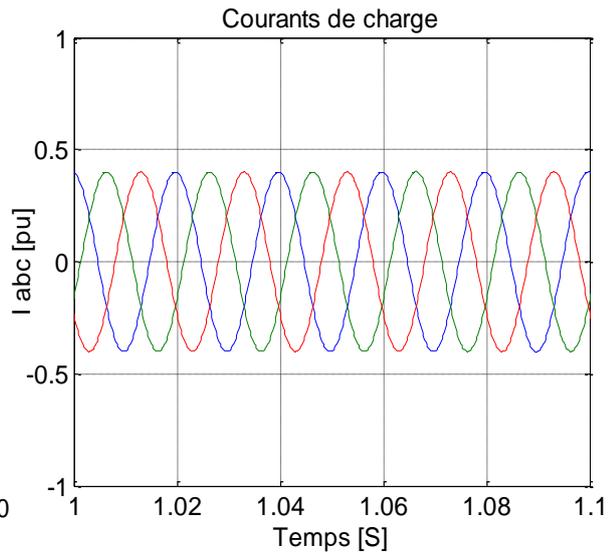


Figure 3.25 Zoom des courants de charge

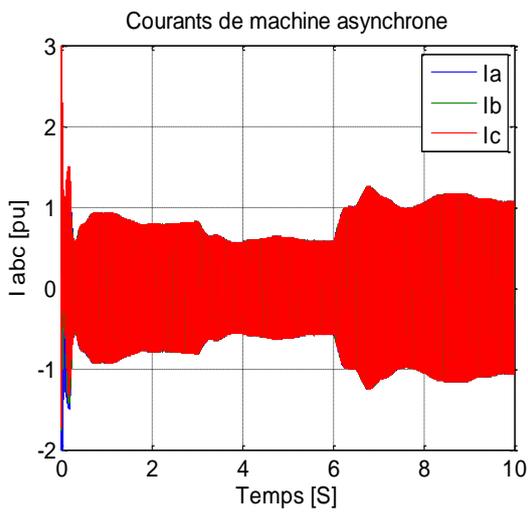


Figure 3.26 Les courants de l'éolienne

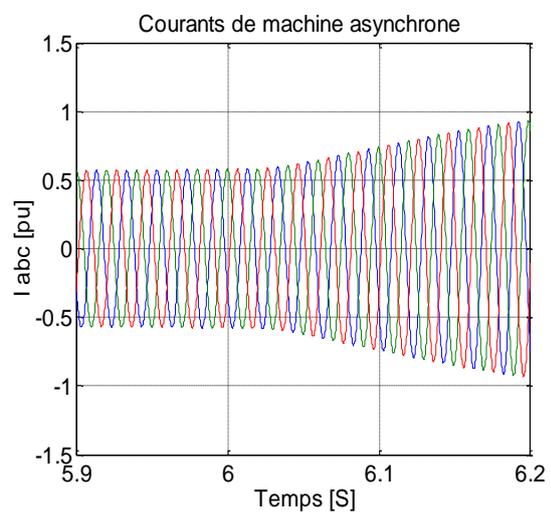


Figure 3.27 Zoom des courants de l'éolienne

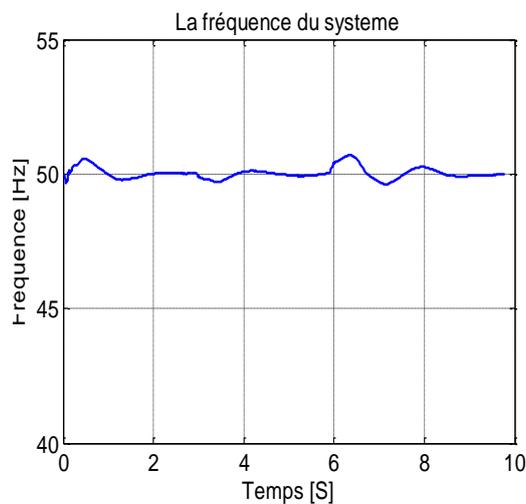


Figure 3.28 Fréquence du système éolien

D'après les résultats de simulation on remarque que la génératrice asynchrone reliée à la turbine fonctionne à une vitesse qui est légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme (figure 3.21). On remarque qu'à  $t=3s$  et à  $t=6s$ , la vitesse du vent à change (figure 3.18) ; ce qui permet de voir un changement dans la puissance générée par la génératrice asynchrone figure 3.20 (puissance éolienne).

Les tensions et les courants de la charge garde ses formes sinusoïdales voir figures 3.22 et 3.23 et les Figures 3.24 et 3.25.

La Figure 3.28 montre que le régulateur de fréquence maintien la fréquence de la charge à 50Hz, après chaque variation de vitesse du vent.

### **3.8 CONCLUSION :**

Ce chapitre a été consacré à l'étude d'une chaîne éolienne dédiée à produire de l'énergie électrique pour des zones éloignées en utilisant une turbine et une génératrice asynchrone auto excitée fonctionnant en mode autonome. Dans ce contexte, on a décrit dans la un premier lieu quelques notions nécessaires à la compréhension au sujet de la technologie éolienne, les différents types d'éoliennes ainsi que les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien.

En ce qui concerne le fonctionnement autonome, la machine asynchrone à cage d'écureuil auto excitée par un banc de capacités apparaît comme une solution intéressante au niveau de production de l'énergie électrique pour un système éolien, grâce à leur faible coût et la maintenance facilitée grâce à l'absence de contacts glissants. Une modélisation de cette dernière avec associée à une turbine et des tests de simulation ont été réalisés sur l'environnement Matlab/Simulink.

# **CHAPITRE 4**

**MODELISATION DES PANNEAUX  
SOLAIRES**

## 4.1 INTRODUCTION :

Dans les dernières années, l'utilisation des sources d'énergies renouvelables pour produire de l'énergie électrique est visible partout dans le monde. Ce scénario est le résultat de l'augmentation de la demande d'énergie en relation avec la réduction de l'offre de carburants classiques qu'avec les préoccupations croissantes au sujet de l'environnement [84]. Parmi les sources d'énergie renouvelables on trouve celle qui se produit par les panneaux photovoltaïques (PV), qui sont actuellement considérés comme la source d'énergie naturelle la plus utile, car elle ne produit aucun gaz à effet de serre au cours de la production d'électricité, elle est distribuée sur toute la terre, et participe en tant qu'un facteur primordial de tous les autres processus de production d'énergie sur terre [85].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente un alternatif intéressant et bien adaptée à des besoins limités. Le développement dans le domaine de semi-conducteurs et l'électronique de puissance mènent à une activité de recherche importante afin d'améliorer et maximiser l'efficacité des modules photovoltaïques. Cette optimisation de configuration de commutation de convertisseur à améliorer le rendement de conversion électrique pour le raccordement des PV au réseau ou à un périphérique de stockage pour une installation autonome [86].

Dans ce chapitre on va s'occuper à l'étude de la modélisation et de la simulation des panneaux photovoltaïques autonomes connectés directement à une charge.

## 4.2 L'ENERGIE SOLAIRE :

### 4.2.1 L'énergie solaire en Algérie :

Dans beaucoup de pays, qui souvent ne bénéficient pas d'un ensoleillement aussi favorable qu'en Algérie, l'énergie solaire gagne en signification à une vitesse exponentielle. La croissance moyenne mondiale du marché a été de 33% au cours des dix dernières années. Ce qui concerne notre pays, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$  au Nord et  $2263\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$  au Sud du pays. Si on prend une autre échelle d'exportation d'importantes quantités de pétrole et de gaz vers l'Europe, l'énergie solaire que peut l'Algérie produire peut satisfaire la totalité des besoins de l'Europe en électricité. Bien que les conditions

géographiques, climatiques et météorologiques soient très favorables, l'énergie solaire en Algérie n'a pas encore percé et ce marché demeure encore presque vierge [55].

#### 4.2.2 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 $\mu$ m) à l'infrarouge (2.5 $\mu$ m). L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m<sup>2</sup> dans l'espace hors atmosphère terrestre. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux prévenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé [87].

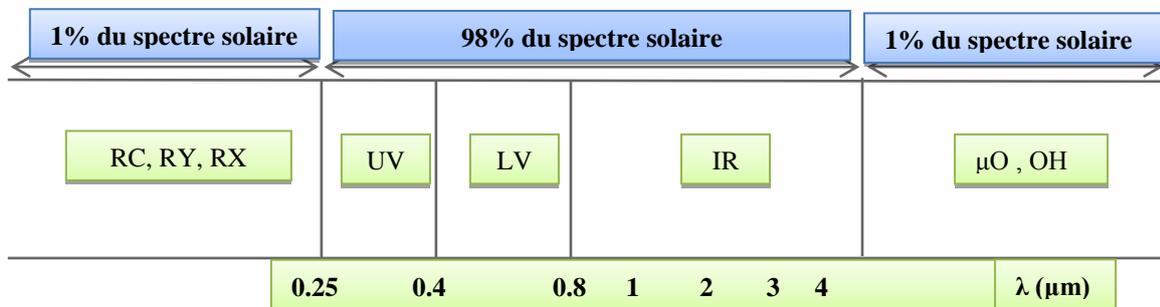


Figure 4.1 Spectre de rayonnement solaire

### 4.3 LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE :

#### 4.3.1 La cellule photovoltaïque :

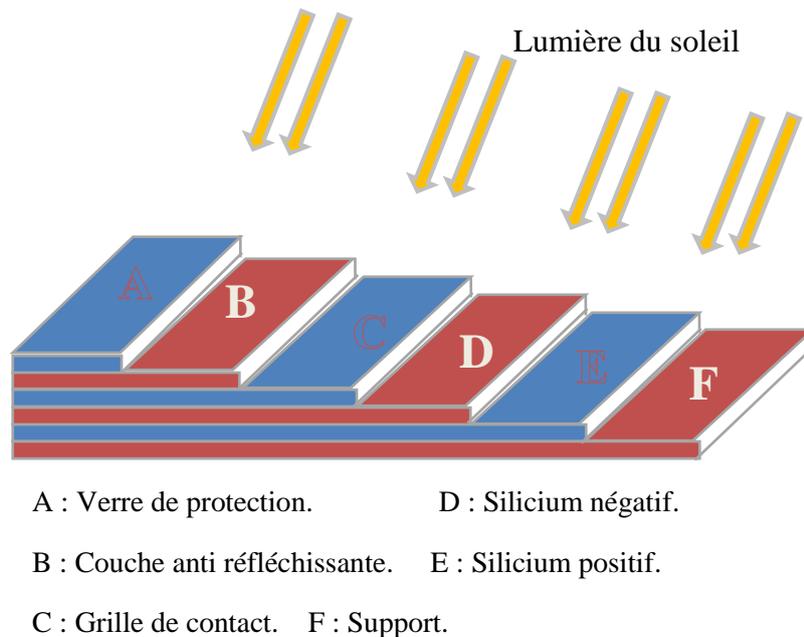
##### 4.3.1.1 Principe de fonctionnement :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3V à 0.7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les

connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{C0}$ ). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) et dépend fortement du niveau d'éclairement [88].

La figure 4.2 suivante illustre une cellule PV.



*Figure 4.2 Structure d'une cellule solaire en silicium*

#### 4.3.1.2 Type des cellules photovoltaïques : on les dévisse en deux catégories

##### a. La cellule cristalline :

C'est une technologie éprouvée et robuste dont le rendement est de l'ordre de 13%. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Les modules en silicium cristallin sont fabriqués industriellement. Toutes les étapes du processus de fabrication ne cessent de progresser régulièrement afin de viser le plus possible les rendements théoriques calculés tout en évitant d'augmenter le prix des modules. Il reste encore aujourd'hui un large potentiel d'optimisation [87].

Les cellules à partir de plaquettes de silicium cristallisé se divisent en deux catégories distinctes, celles à partir de silicium monocristallin et celles à partir de silicium poly-cristallin (figure 4.3). Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium multi-cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 24.7% contre 19.8% de rendement record sur petite cellule en laboratoire [89].

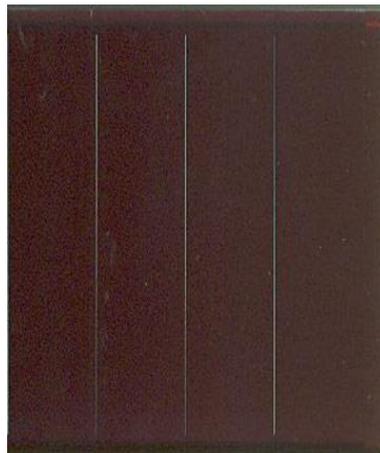


*Figure 4.3.a) Cellule PV monocristalline*

*Figure 4.3. b) Cellule PV poly cristalline*

#### b. La cellule amorphe :

En comparaison avec la cellule cristalline le coût est moins. Les cellules amorphes sont utilisées partout et en particulier dans une production d'énergie électrique faible, par exemple une électrification destinée à alimenter des montres, des calculatrices, luminaires de secours. Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, le rendement est de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Les cellules en silicium amorphe sont actuellement de moins en moins utilisées : 9,5 % de la production mondiale en 2000 alors qu'elles représentaient 12 % en 1999. (Figure 4.4) [90]



*Figure 4.4 Cellule photovoltaïque amorphe*

#### 4.3.1.3 Les semi-conducteurs :

On appelle semi-conducteur un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. En effet, les valeurs usuelles de la conductivité ( $\sigma$ ) des isolants sont comprises

entre  $1.e^{-11}$  et  $1.e^{-19}$  S/cm et celles des conducteurs entre  $6.e^7$  et  $1.e^4$  S/cm. Il existe pourtant des corps qui ont une résistivité intermédiaire comprise entre  $1.e^3$  et  $1.e^{-6}$  S/cm, on les appelle des semi-conducteurs [91].

On sait qu'au sein des structures cristallines de la matière, les électrons ont des énergies distinctes qui appartiennent à certains ensembles de valeurs appelées bandes d'énergies. Les bandes de faible énergie correspondent à des électrons participant au maintien de la structure cristalline. Les bandes de hautes énergies correspondent à des électrons quasi libres, se détachent de la structure et par conséquent peuvent participer à une conduction électrique. On distingue les isolants et les conducteurs par la différence d'énergie qu'il existe entre ces bandes [92].

Plusieurs matériaux peuvent rentrer dans la catégorie des semi-conducteurs comme le silicium qui prend l'image du matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, de son abondance naturelle et de son coût de mise en œuvre économique. On peut citer quelques autres matériaux comme le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium [93].

On prend le nom semi-conducteur intrinsèque lorsque le matériau est pur, dans ce cas il ne comporte aucune impureté et son comportement électrique ne dépend que de la structure du matériau. Ce comportement correspond à un semi-conducteur parfait, c'est-à-dire sans défaut structurel ou impureté chimique. Un semi-conducteur réel n'est jamais parfaitement intrinsèque mais peut parfois en être proche comme le silicium monocristallin pur [84].

#### **4.3.2 Le panneau solaire :**

Le panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série ou bien en parallèle afin de produire la puissance souhaitable. Les premières implantations des structures étaient fondées sur l'association de plusieurs modules photovoltaïques attachés par un seul convertisseur on l'appelle un onduleur centré comme indiqué dans la figure 4.5.

Le rendement de cette structure est faible à cause de l'insertion obligatoire des diodes dans chaque branche parallèle afin d'éviter la dispersion d'énergie. Il y'a d'autre limitation tel que la perte en puissance qui touche la non-application réel d'algorithme MPPT ou chaque branche peut ne pas fonctionner en maximum de production de puissance.

Ce qui concerne la protection des panneaux solaires, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas

d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles :

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds [88].

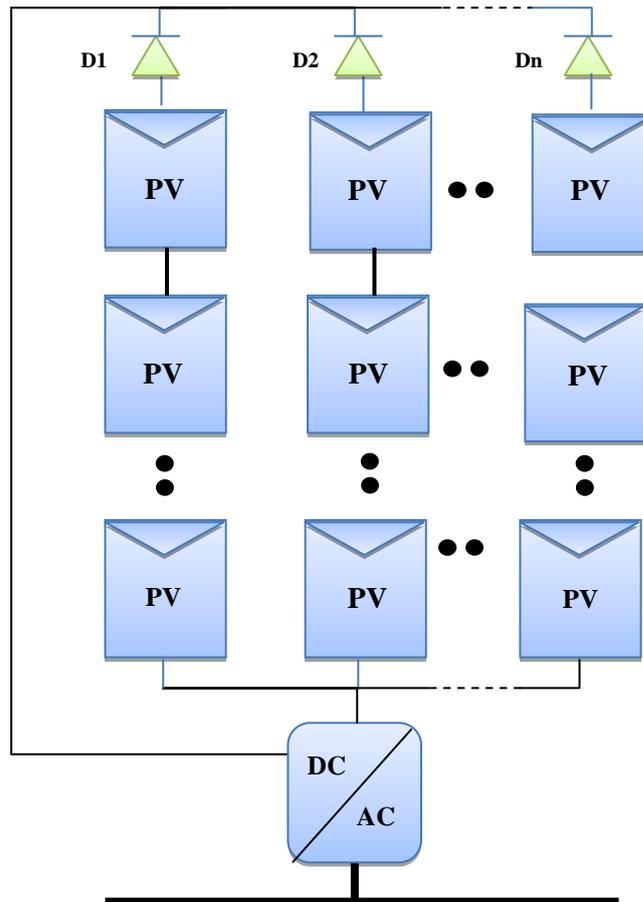


Figure 4.5 La première implantation d'une structure PV [84]

Cependant le choix de la structure convenable des modules photovoltaïques reste lié au niveau de la connexion en série comme la montre la figure 4.6 a) et b), cette topologie permet un accroissement d'efficacité et une meilleure utilisation de panneau photovoltaïque.

L'avantage principal de cette structure réside dans la suppression des pertes de puissance à cause d'absence des diodes de retour et l'application parfaite d'algorithme MPPT qui nous permet de produire une puissance maximale. Une autre structure très intéressante applique l'utilisation du micro onduleur lié avec un seul panneau figure 4.6 c), dans ce cas chaque panneau peut fonctionner au point de puissance maximale. Cette topologie touche une

production d'une faible puissance typiquement entre 200w et 300w. L'avantage principal de ses micros onduleurs réside dans l'emplacement facile en cas d'une panne, ils présentent aussi une simplicité de raccordement avec le réseau ou bien la charge.

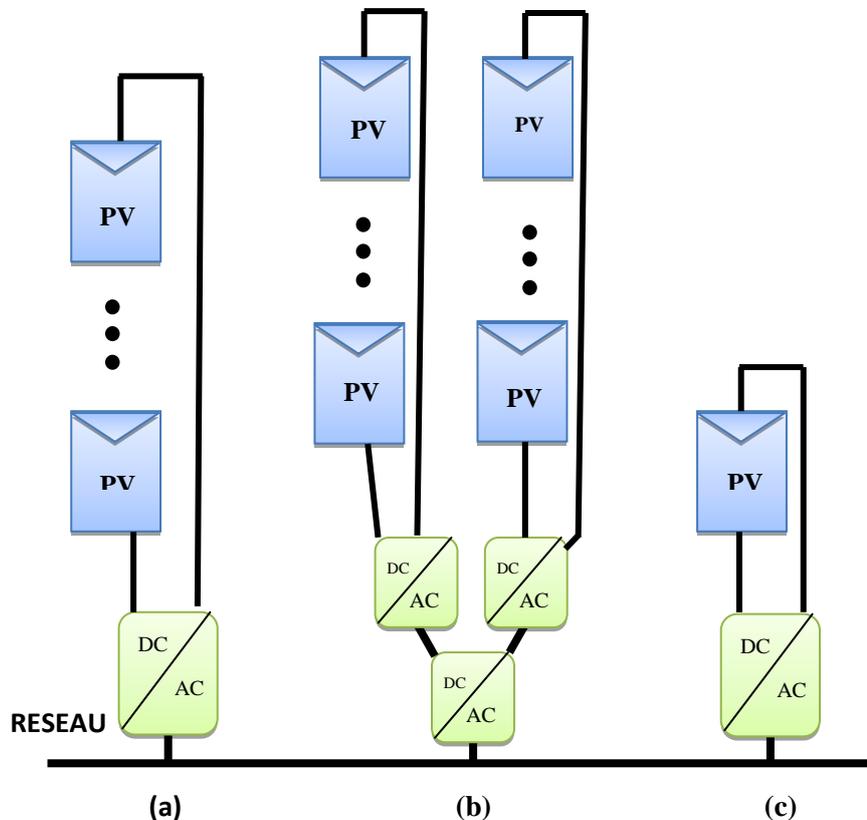


Figure 4.6 Plusieurs formes de structures PV [84]

Le micro-onduleur est fixé sur le panneau, il doit supporter toutes les conditions météorologiques, cela implique que ce convertisseur est non réparable. En outre pour les systèmes qui ont une longue durée de vie, les composants du panneau comme les semi-conducteurs, les filtres et principalement les systèmes de control doivent fonctionner dans une température élevée ce qui augmente la production.

Dans les revues scientifiques une simulation d'un onduleur connecté à des PVs est présentée dans l'article [94] par *J.T. Bialasiewicz* et *E.Muljadi*. Cependant l'optimisation du PV après le choix de sa structure est une étape très importante. Cette tâche est en relation avec le site d'installation du système photovoltaïque. Dans [95] les auteurs présentent une étude d'évaluation pour des PVs selon deux critères celle de l'éclairage et du type de charge demandée installée dans le site. Dans le même aspect une autre approche similaire est présentée par *Ziyad M. Salameh et al* dans [96] afin de trouver une bonne configuration des PVs selon les mêmes facteurs pour un site spécifié, dans la même étude les données de force

d'éclairement ont été enregistrées pour une trentaine d'années. Pas très loin de l'optimisation, une méthode déterministe et de la probabilité sont présentées par *G. Capizzi et al* dans [97].

### 4.3.3 L'adaptation entre la charge et la source :

L'écart entre la production électrique du générateur photovoltaïque et la consommation de la charge crée une indisponibilité sérieuse d'un mécanisme d'adaptation entre le PV et la charge. Cet outil permet d'extraire un maximum de puissance dans chaque instant afin de la transférer pour la charge. L'étage d'adaptation joue un rôle très important dans ce concept, il se permet d'être une interface d'interconnexion entre la source d'énergie et la charge, il peut y accéder à une production maximale de puissance à travers un système de contrôle capable de détecter les défaillances et la non-synchronisation entre l'entrée et la sortie. Un mécanisme de plus peut complexer le système et rend compte une augmentation de prix d'exploitation et d'application.



Figure 4.7 Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [88]

Concernant la technique d'adaptation du générateur PV, on trouve dans l'article [98] présenté par *F.Z. Zerhouni* et *B. Stambouli* une utilisation d'une méthode spécifiée à la configuration des modules photovoltaïques selon l'éclairement solaire et la variation dans la charge. Les auteurs ont trouvé que le couplage direct entre le PV et la charge persiste des pertes de puissance remarquable, implique d'un point d'opération dépendant particulièrement de la charge. Pour cela ils ont étudié une méthode de couplage par changement de configuration. Ils ont fait prendre un générateur constitué de deux modules disposés en configuration série alimentent une charge résistive. Pour le premier essai une bonne adaptation se voit avec le couplage direct, un deuxième essai qu'ils ont fait en connectant le générateur avec d'autres charges donne une mauvaise adaptation. Cela donne un principe de changement de configuration simple, suppose qu'un nombre total de charges fixent les modules photovoltaïques. Un deuxième principe touche un changement de configuration selon l'éclairement. Ils ont observé que pour un même nombre de modules, pour une même charge, la puissance d'opération pour le récepteur varie selon la variation de l'éclairement.

## 4.4 AVANTAGES ET INCONVENANTS DES PV :[99], [90], [49]

### 4.4.1 Avantage :

Les avantages des générateurs photovoltaïques sont plusieurs et leur application se développe d'un moment à l'autre, parmi eux on cite :

- une haute fiabilité ou l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. il ne nécessite ni combustible, ni un transport, ni un personnel hautement spécialisé.
- ils sont recyclables, les matériaux utilisés pour leur production peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire plus de matériaux.
- L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments. Les modules solaires peuvent être en façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année. Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale.

### 4.4.2 Inconvénients :

Malgré les avantages que les générateurs photovoltaïques présentent, des points faibles peuvent se manifester au niveau de fonctionnement et de la fabrication :

- une fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesels.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. la fiabilité et les performances du système

restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.

- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable. Il n'est pas prévisible, il dépend du niveau d'ensoleillement. Cependant la production d'électricité n'est pas constante.

#### **4.5 MODELISATION DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE :**

L'étude du fonctionnement des systèmes photovoltaïques nécessite des modèles permettant de calculer l'énergie produite par l'installation photovoltaïque. Dans la littérature plusieurs chercheurs ont étudié ses modèles spécifiés. Parmi eux qui ont utilisé matlab comme outil informatique capable de bien projeter le fonctionnement réel du module photovoltaïque. C'est le cas des travaux présentés dans [85] [100][101] [102]. D'autres chercheurs ont utilisé des approches numériques et des modèles réels pour la modélisation des PVs, comme en [103] les auteurs cherchent à trouver des paramètres non linéaires pour la courbe I-V afin de maximiser la puissance et trouver les points critiques. Cette méthode de modélisation facilite la tâche aux constructeurs en vision de trouver la meilleure façon pour faire développer des modèles industriels qui fonctionnent d'une façon optimale. Aussi bien et dans l'article [104] les auteurs proposent une nouvelle approche numérique pour une modélisation des PVs en temps réel par des émulateurs. Dans [86] les auteurs utilisent un modèle physique sous la forme d'un circuit des diodes et des résistances qui vont permettre de fonctionner comme un PV, cette tâche est très utile au recherche dans plusieurs laboratoires pour un PV connecter à un réseau ou bien autonome connecter à un système de stockage ou à une charge. Un autre outil est présenté par *F. Adamo et al* dans l'article [105] simule le même comportement d'un PV.

##### **4.5.1 Modèle simplifié du panneau photovoltaïque :**

La modélisation est l'outil de base de la simulation d'un système photovoltaïque réel, pour bien la maîtriser il est nécessaire d'analyser l'influence des différents facteurs sur les cellules photovoltaïques et de prendre en considération les caractéristiques indiquées par les producteurs. Les modèles mathématiques de cellules photovoltaïques sont basés sur des équations théoriques décrivant le fonctionnement des cellules photovoltaïques, elles sont généralement associées en série ou bien en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel

électrique usuel. Les modèles empiriques reposent sur des valeurs différentes extraites de la courbe  $I(V)$  des générateurs photovoltaïques qui se rapprochent de l'équation caractéristique des panneaux solaires à l'aide d'une fonction analytique [100].

La caractéristique  $I(V)$  du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent (figure 4.8). Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série  $R_S$  et parallèle (shunt)  $R_p$  pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

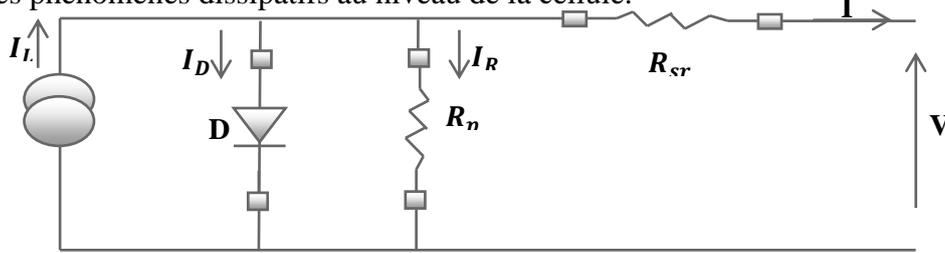


Figure 4.8 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance parallèle rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si cette pénétration est profonde). Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [106].

A partir de la figure 4.8 la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I_L = I_D + I_R + I \quad (4.1)$$

Le courant de jonction  $I_D$  est donné par :

$$I_D = I_0 \cdot \left( e^{q \left( \frac{V + R_{SR} \cdot I}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad (4.2)$$

Le courant dans la résistance  $R_p$  est donné par :

$$I_R = \frac{V + I \cdot R_{SR}}{R_p} \quad (4.3)$$

A partir de l'équation (4.1) on obtient l'expression de courant  $I$  :

$$I = I_L - I_D - I_R \quad (4.4)$$

Remplaçons dans (4.4) les équations (4.2) et (4.3) l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_L - I_0 \cdot \left( e^{q \left( \frac{V + R_{SR} \cdot I}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_{SR}}{R_p} \quad (4.5)$$

Où :

Si on suppose que la résistance parallèle est infinie ( $R_p$ ) l'équation (4.5) devienne:

$$I = I_L - I_0 \cdot \left( e^{q \left( \frac{V + R_{SR} \cdot I}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right) \quad (4.6)$$

L'équation (4.6) en termes de  $I$  et  $V$  n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton-Raphson) doit être appliquée.

#### 4.5.2 Caractéristiques du module photovoltaïque : [85][101][88]

Chaque module photovoltaïque est caractérisé par :

- Une puissance crête  $P_C$  : c'est une puissance électrique maximale fournie par le module dans les conditions standard ( $25^{\circ}C$  et un éclairement de  $1000 \frac{W}{m^2}$ ).
- Une caractéristique  $I(V)$  : représente une courbe de courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Une tension à vide  $V_{C0}$  aux bornes du module en absence de courant, pour un éclairement optimale.
- Un courant de court-circuit  $I_{CC}$  débité par un module court-circuité pour un éclairement optimal.
- Point de fonctionnement optimum  $(U_m, I_m)$  : lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, ou  $P_m = U_m \cdot I_m$ .
- Un rendement maximal se définit par un rapport d'une puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme se définit par un rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut y'avoir la cellule.

### 4.5.3 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque :

Dans [107] les auteurs *F. Adam et al* appliquent un modèle pour une estimation des paramètres d'un module photovoltaïque. Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

#### 4.5.3.1 Courant de court-circuit :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur *PV* est nulle. Dans le cas idéal ( $R_{sr}$  nulle et  $R_p$  infinie), ce courant se confond avec le photon courant  $I_L$  dans le cas contraire, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (4.2), on obtient:

$$I_{CC} = I_L - I_0 \cdot \left( e^{q \left( \frac{V + R_{SR} \cdot I}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right) - \frac{I_{CC} \cdot R_{SR}}{R_p} \quad (4.7)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_0 \cdot \left( e^{q \left( \frac{V + R_{SR} \cdot I}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right) \text{ devant } I_L$$

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :  $I_{CC} = \frac{I_L}{\left( 1 + \frac{R_{SR}}{R_p} \right)}$

#### 4.5.3.2 Tension de circuit ouvert :

C'est la tension  $V_{C0}$  pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_L - I_0 \cdot \left( e^{q \left( \frac{V + R_{SR} \cdot I}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{C0}}{R_p} \quad (4.8)$$

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

$$V_{C0} = \frac{q}{n \cdot K \cdot T} * \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (4.9)$$

#### 4.5.3.3 Facteur de forme :

On appelle facteur de forme  $FF$ , le rapport entre la valeur maximale de la puissance

pouvant être extraite  $V_{pm} \cdot I_{pm}$  de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit  $V_{C0} \cdot I_{CC}$

Où :  $I_{CC}$  intensité de court-circuit et  $V_{C0}$  tension de circuit ouvert

$$FF = \frac{V_{pm} * I_{pm}}{V_{C0} * I_{CC}} \quad (4.10)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

#### 4.5.3.4 Le rendement :

Le rendement ( $\eta$ ), des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{0C} \cdot I_{CC}}{P_{in}} \quad (4.11)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [49].

#### 4.5.4 Influence des paramètres externes sur la caractéristique I (V):[108] [109]

Plusieurs articles ont été élaborés afin de connaître l'influence des paramètres externes sur le fonctionnement d'un PV. Dans [106] A. Ould Mohamed Yahya a présenté un modèle de simulation pour prédire la performance d'un système PV fonctionnant dans les conditions météorologiques d'un site d'installation, sous l'influence des différentes irradiances solaires, des différentes températures et pour des variables résistances séries et parallèles. Dans le même cadre les auteurs S. Rustemli et F. Dincer dans l'article [101] ont examiné le fonctionnement d'un PV sous l'influence de température.

La figure 4.9 présente, pour un éclairement et une température donnée, trois points remarquables: le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, et la puissance optimale qui est la puissance maximale ( $P_{max}$ ) délivrée par le module PV. Donc pour extraire le maximum d'énergie des modules PV, il faut les faire fonctionner au point de  $P_{max}$ .

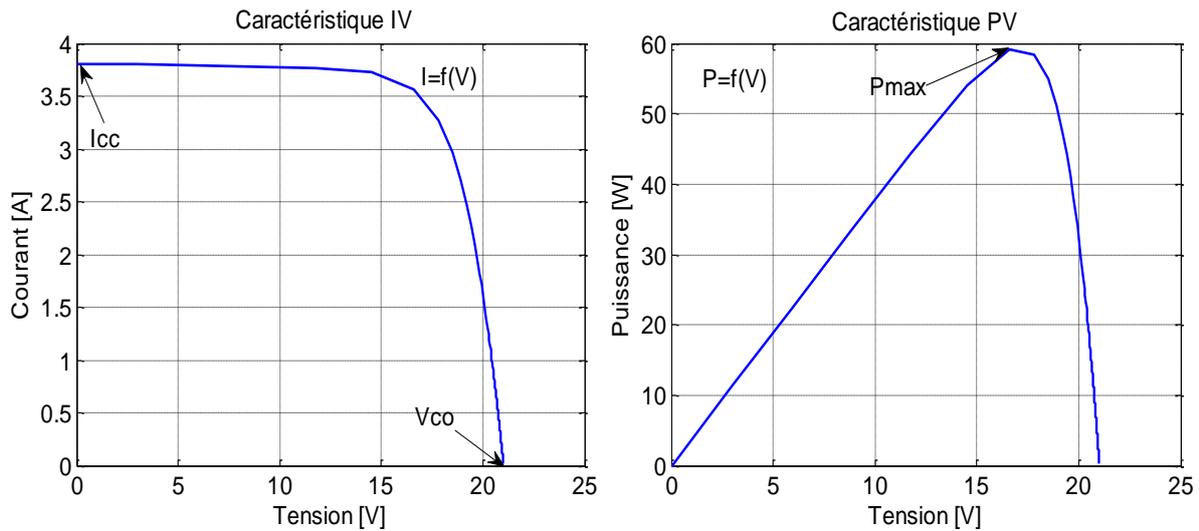


Figure 4.9 a) Caractéristique  $I(V)$  d'un PV b) Caractéristique  $P(V)$  d'un PV

4.5.4.1 Influence des résistances série et shunt :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. La figure 4.10.a montre l'influence de  $R_s$  sur la caractéristique  $I = f(V)$ . La courbe en bleu correspond à une valeur non nulle de  $R_s$ . Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule. Quant à la  $R_{sh}$  est liée directement au processus de fabrication, son influence pour de très faibles valeurs de courant. La figure 4.10.b montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspond à un fonctionnement comme source de courant.

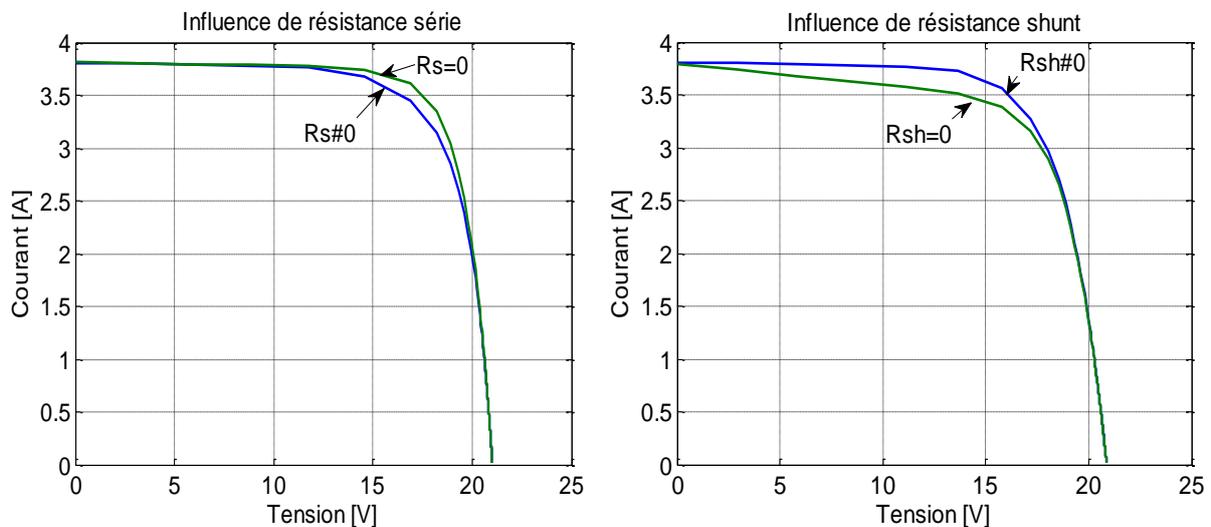


Figure 4.10 a) Influence de résistance série b) Influence de résistance shunt

#### 4.5.4.2 Influence de l'éclairement :

Les figures 4.11.a et 4.11.b, montrent respectivement la caractéristique I-V et P-V d'un module PV en fonction de l'éclairement incident et à température ambiante. Nous constatons que les variations de courant de court-circuit (c'est à dire pratiquement le photo-courant créé dans le module PV est proportionnel au flux solaire incident). D'où le forte influence de l'éclairement sur le courant débité par le module PV. Cette influence se traduit par une augmentation de la puissance disponible dans les modules PV chaque fois l'éclairement augmente et à chacune des valeurs du flux lumineux correspond à une puissance électrique maximale que pourrait fournir un module PV [104].

$$I_{CC} = I_{CC}^* \left( \frac{G}{G^*} \right) + \alpha_1 (T - T^*) \quad (4.12)$$

$I_{CC}^*$  : Représente le courant de court-circuit.

$\alpha_1$  : ( $A/^0 C$ ) Coefficient obtenu empiriquement.

$G^*$  : Irradiation de référence vaut  $1kW / m^2$ .

$T^*$  : Température ambiante égale à  $25^0 C$ .

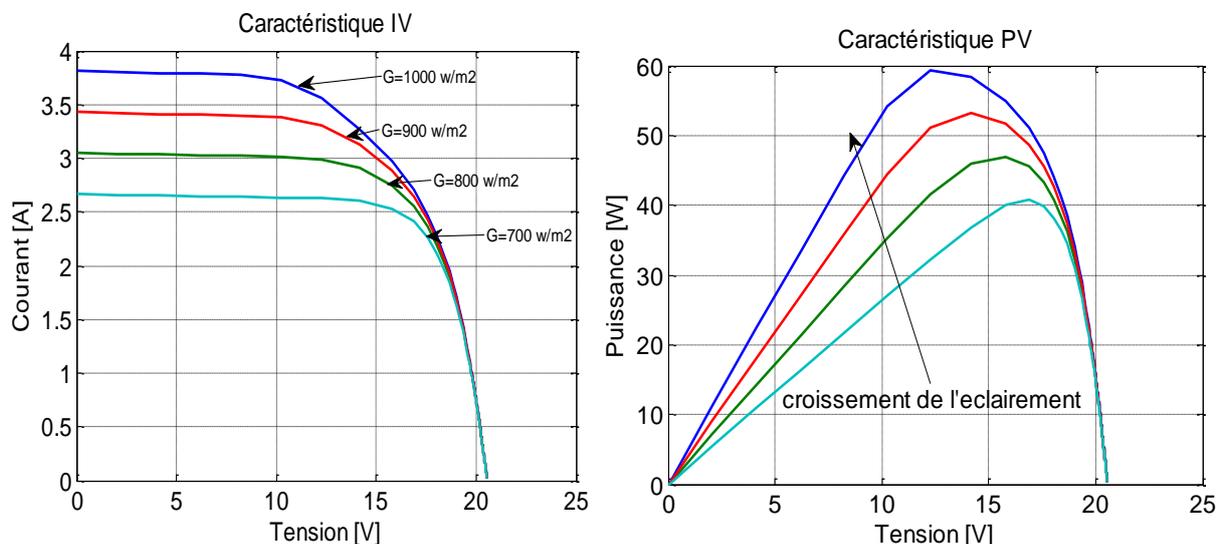


Figure 4.11 a)  $I(V)$  en fonction de l'éclairement b)  $P(V)$  en fonction de l'éclairement

#### 4.5.4.3 Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement d'un module PV. Nous constatons à la figure 4.12, qui représente la caractéristique  $I(V)$  pour un éclairement constant et pour diverses valeurs de la température, que le courant de court-circuit  $I_{CC}$  varie peu en fonction de température. Par contre, l'augmentation de la température engendre une

diminution de la tension en circuit ouvert et se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible dans les modules PV (figure.4.13). D'où l'influence de la température sur le comportement du module PV [110].

La tension à vide d'un module PV en fonction de la température et de l'éclairement est donnée par la relation suivante:

$$V_{C0} = I_{C0}^* + \alpha_2(T - T^*) - (I_{CC} - I_{CC}^*)R_s \tag{4.13}$$

$V_{C0}^*$  et  $I_{CC}^*$  : représentent respectivement la tension de court-circuit et le courant de court-circuit à  $T= 25^{\circ}C$  et  $G=1kW/m^2$ .

$\alpha_2$  : ( $V/^{\circ}C$ ) Coefficient obtenu empiriquement.

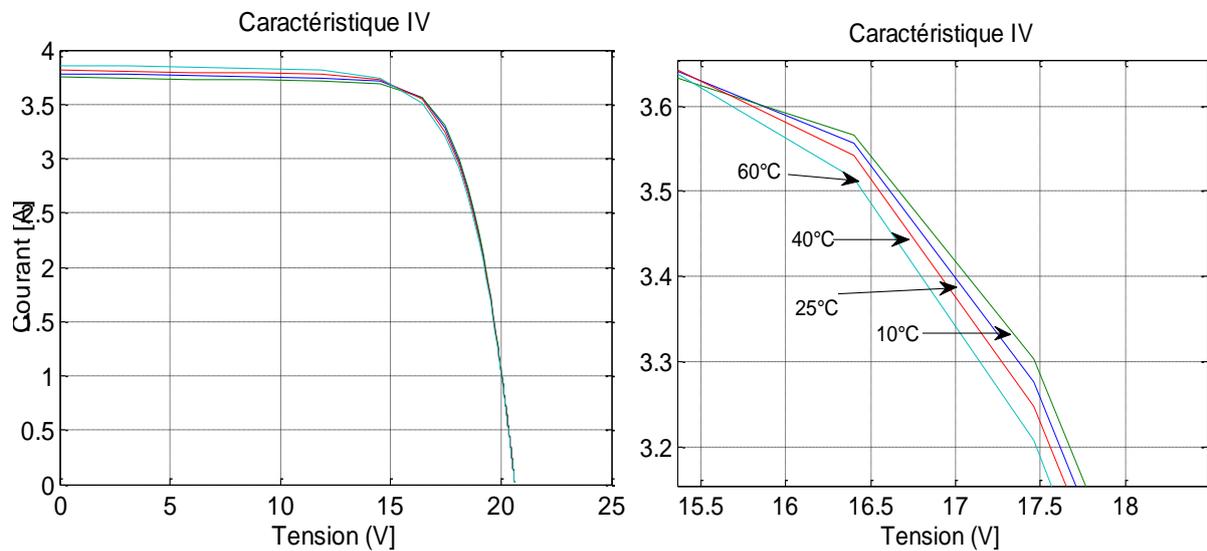


Figure 4.12 a)  $I(V)$  en fonction de température b) Zoom sur la caractéristique  $I(V)$

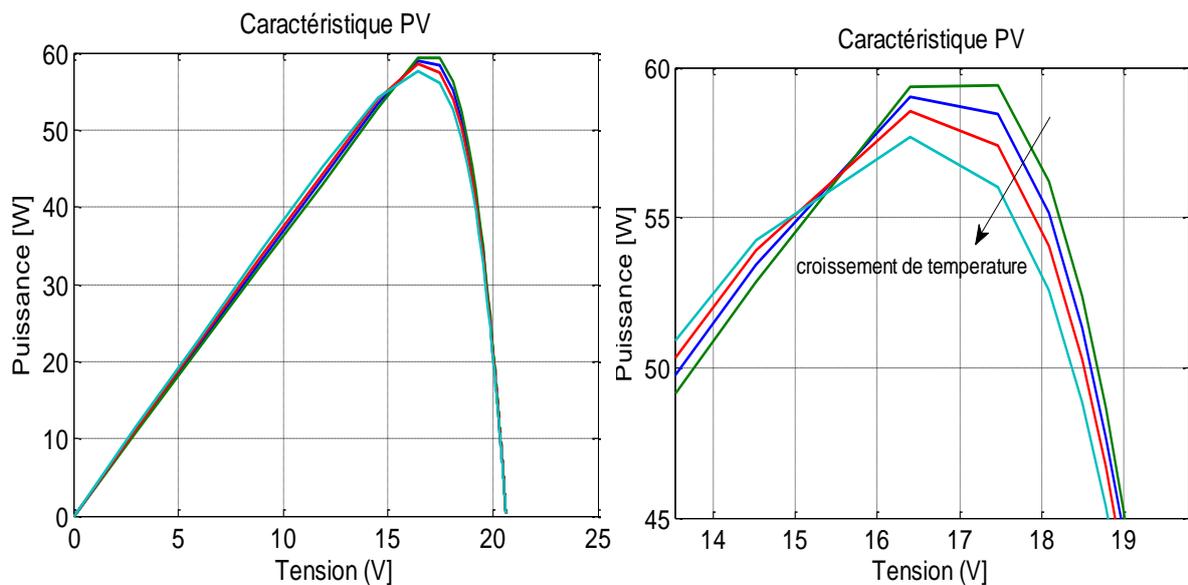


Figure 4.13 a)  $P(V)$  en fonction de température b) Zoom sur la caractéristique  $P(V)$

#### **4.6 CONCLUSION :**

Dans ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. Nous avons présenté le concept de modules PV avec les différents éléments qui les construisent. Deux types de cellules ont été présentées l'une cristalline et la deuxième amorphe pour un critère de comparaison. L'adaptation entre la charge et la source est aussi un critère majeur dans la conception et la réalisation de ce type de générateurs, on la trouve étudié dans plusieurs études de recherches et de développement.

Dans la deuxième partie nous avons entamé la modélisation et la simulation d'un modèle simplifié du générateur photovoltaïque. Les différentes caractéristiques qui interviennent pour un module photovoltaïque ont été présentées. Aussi bien et dans la même partie, des paramètres externes d'une cellule photovoltaïque ont été étudiées afin de comprendre leurs influences sur les différents caractéristiques des modules PV.

# **CHAPITRE 5**

**APPLICATION  
ET SIMULATION D'UN SYSTEME  
HYBRIDE**

## 5.1 INTRODUCTION :

Les systèmes hybrides utilisent différentes sources d'énergies comme l'éolien, le photovoltaïque et le générateur diesel. Ce type de système peut représenter une solution pour les régions éloignées d'un grand réseau interconnecté [46]. Cependant le dimensionnement et l'architecture de système de génération d'énergie est une étape primordial dans la conception et la réalisation de même système, ce qui n'est pas bien traduisés dans la littérature. Plusieurs études prennent le paramètre variable de la plupart des énergies renouvelables pour la réalisation d'un système de contrôle complexe [111]. Dans la même tâche un contrôle de la tension et de la fréquence pour un système éolien-diesel est montré dans l'article [112]. La modélisation étant aussi un facteur majeur pour des études élaborées afin de simuler un bon fonctionnement de système. Plusieurs sont les logiciels qui nous permettent de la faire. Dans [113] une modélisation d'un système hybride de génération d'énergie est présentée par le logiciel HOMER. Dans [114], [115] une modélisation et simulation de différents systèmes hybrides ont été présentées sur l'outil MATLAB.

Pour but d'améliorer la qualité de l'énergie produite par un système de production d'énergie électrique, un système hybride est proposée dans ce chapitre. Une application d'un système hybride est simulé sur le logiciel HOMER afin d'alimenter un site situé à une région de la ville de Souk Ahras, pour une optimisation qui permet de déterminer le type du système hybride réel a installé. Des résultats de simulations sous Matlab\Simulink seront présentés pour confirmer le bon fonctionnement de système afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

## 5.2 ARCHITECTURE DES SYSTEMES HYBRIDES :

Les différents générateurs d'énergies qui construisent le système hybride peuvent se connecter en plusieurs configurations ce qui rend la topologie du système plus variée selon notre besoin. Deux types d'architectures peuvent existées le plus souvent, une à un bus CC et une autre à un bus mixte CA/CC.

### 5.2.1 Architecture à bus CC:

Dans cette topologie du système, la puissance fournie par chaque générateur est centralisée sur un bus CC, la connexion de toutes les sources sur un seul bus simplifie le système de commande et mène à bien maîtriser leur fonctionnement au niveau de dimensionnement optimale de générateur diesel, ce dernier est connecter à un onduleur pour alimenter les charges à CA. En outre tous les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord

leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs, ce phénomène peut faiblir le rendement de système.

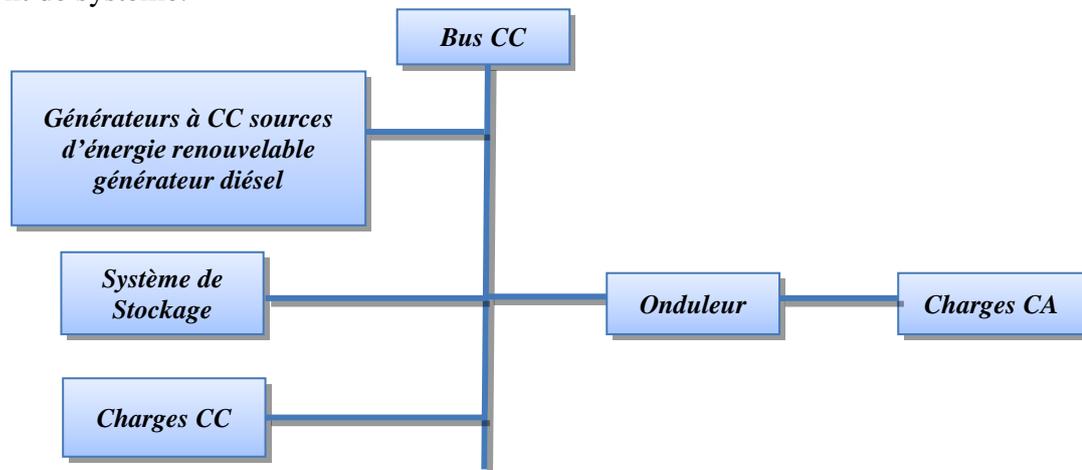


Figure 5.1 Configuration d'un SH à bus CC[33]

### 5.2.2 Architecture à bus CC /CA :

Dans cette configuration, les générateurs d'énergie renouvelable et le générateur diesel peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement sans passer par un convertisseur de puissance, ce qui augmente le rendement du système et minimise les pertes en puissance. Le générateur diesel et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou bien en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie et donnant un avantage particulier pour un fonctionnement des deux sources pendant les pics des charges. La présence d'un convertisseur bidirectionnel peut remplacer le redresseur et l'onduleur situent entre les deux bus. Mais ce mixage de bus complique le système à cause de fonctionnement parallèle des composants.

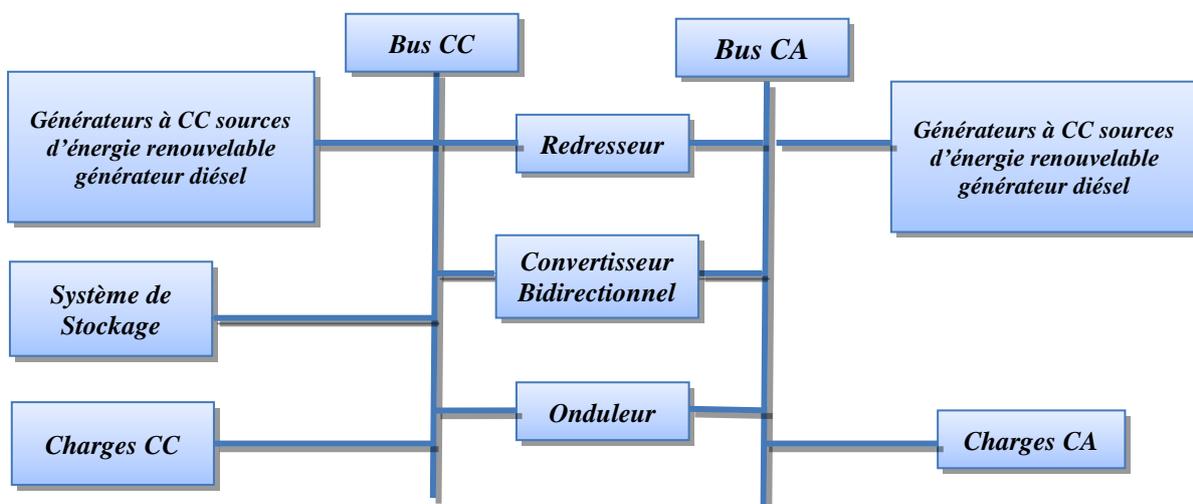


Figure 5.2 Configuration du SH à deux bus à CC et à CA [33]

## **5.3 APPLICATION DU LOGICIEL HOMER POUR L'OPTIMIZATION : SOUK AHRAS :**

### **5.3.1 Présentation de l'outil de simulation :**

Le logiciel HOMER (hybrid optimization model for electric renewables) développé par NREL (national renewable energy laboratory) aux étas unis, prend en charge l'opération d'évaluation des conceptions des différentes systèmes de génération d'énergie électrique, que ce soit connecter à un réseau électrique classique ou bien éloigné de ce dernier pour une variété d'applications. Il permet d'analyser et de combiner divers sources d'énergie afin d'arriver à afficher une configuration optimale d'un système hybride capable de fournir de l'énergie au site spécifié d'une manière faisable selon certains critères techniques et économiques [20].

Pour simuler un système hybride de génération d'énergie, il faut définir tous les éléments de ce dernier, en utilisant les composants définis dans la bibliothèque du logiciel comme les éoliennes, les panneaux photovoltaïques, les groupes électrogènes et les convertisseurs statiques etc. S'il est nécessaire d'ajouter un composant qui n'existe pas dans la liste des éléments définis par défaut, le logiciel nous permet de l'ajouter en introduisant toutes ces caractéristiques techniques ainsi que son coût. On peut aussi modifier les caractéristiques d'un composant déjà existant dans la bibliothèque.

Toujours HOMER, simule le fonctionnement d'un système en faisant des calculs de bilan d'énergie à chaque heure pour chacun des 8760 heures dans une année. Il trouve la combinaison la moins coûteuse qui répond aux charges électriques et thermiques spécifiques. HOMER simule plusieurs configurations, il optimise le coût pour un cycle de vie donné et génère des résultats de sensibilité pour la plupart des situations [116].

Ainsi il permet d'effectuer des analyses et de répondre aux nombreuses questions de conception tels que:

- Quelles technologies sont les plus rentables ?
- Quelle est la taille des composants de système hybride ?
- Que deviennent-ils les aspects économiques du projet si les coûts ou les charges changent?
- Es-que les sources d'énergie renouvelables peuvent fournir l'énergie nécessaire ?

### **5.3.2 L'emplacement choisit :**

L'objectif de cette étude est de choisir un village dans une région dans l'Algérie pour étudier la faisabilité de l'utilisation d'un système hybride de génération d'énergie pour

alimenter des maisons tout au long de l'année. La ville choisit pour l'étude était Souk-Ahras située dans l'EST NORD de l'Algérie dans l'altitude  $36^{\circ}16'7''$  N et longitude  $7^{\circ}56'8''$  E.

Afin de construire ce système d'énergie, on doit disposer tous les informations pour l'emplacement sélectionné. Les informations typiques sont : le profil de charge qui devrait être pris en charge par le système, le rayonnement solaire pour les panneaux solaires, la vitesse du vent pour la production d'énergie éolienne, le coût initial de chaque composant (diesel, générateurs d'énergies renouvelables, batteries, convertisseurs), le coût du carburant et la durée de vie du projet.

Ensuite, on utilisant ces données, on peut effectuer la simulation pour obtenir la meilleure configuration du système d'alimentation hybride pour cet endroit précis.

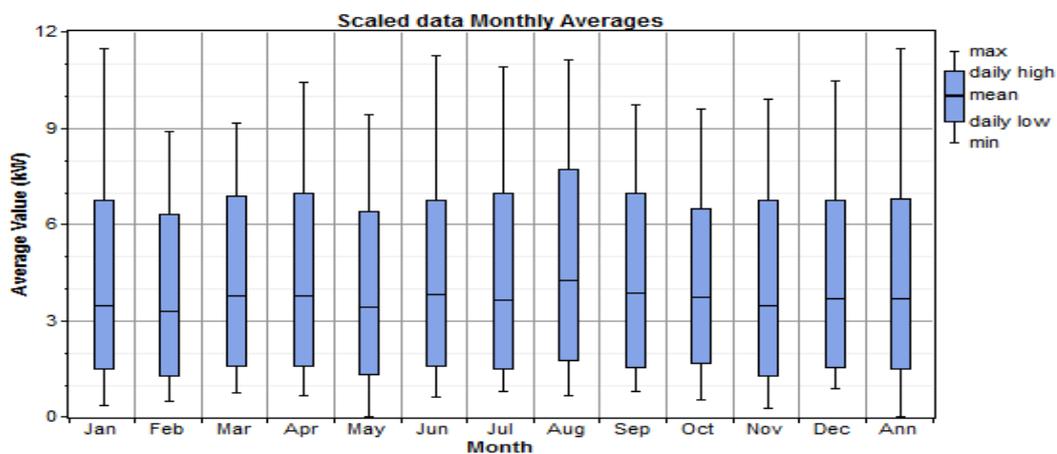


Figure 5.3 Le profil de charge dans une année

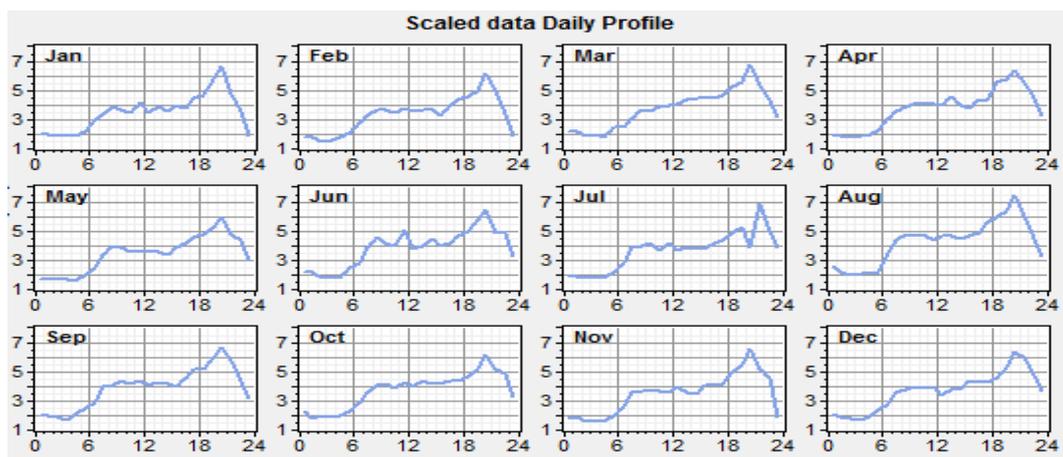


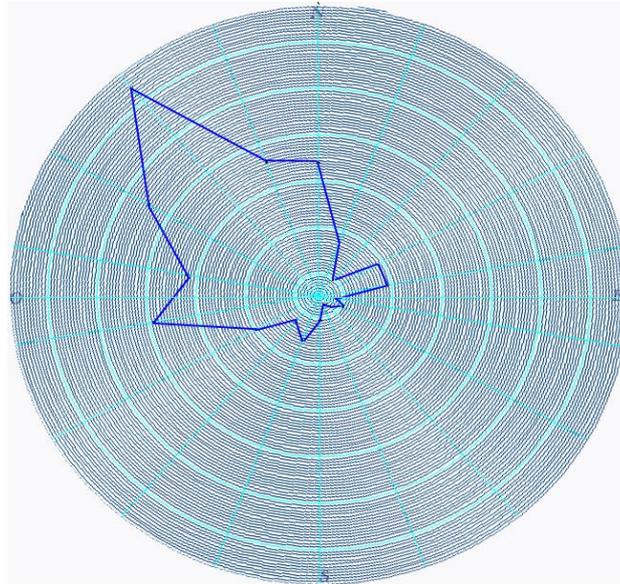
Figure 5.4 Le profil de charge journalière suivant les saisons

La figure 5.3 et 5.4 montre le profil de charge de nombre de maisons sélectionnées. Le processus de simulation du système hybride choisi a été analysé pour voir si l'utilisation du système d'alimentation sera possible ou non. Il est important de noter que ces maisons

présentées dans l'exemple d'étude sont déjà raccordées au réseau, l'objectif supplémentaire était de voir l'effet de l'utilisation du système hybride pour leur fournir de l'énergie électrique. La charge journalière est de 88 KWh par jour, la charge journalière pour le consommateur algérien est de 5 KWh à 10 KWh par jour, et donc la charge de système construit par HOMER simule l'alimentation d'énergie pour une somme de maisons qui peut atteindre les 10 foyers.

Cependant les informations concernant les sources d'énergie renouvelables comme les données solaires et éoliennes sont présentées dans le tableau 5.1.

Ce qui concerne la vitesse du vent dans le site de Souk Ahras, les informations sont obtenues par la station de météo de la ville. Par l'utilisation de ses données, la rose des vents montrée dans la figure ci-dessous montre que les vents prédominants proviennent de l'ouest/nord-ouest.



*Figure 5.5 La rose des vents de la région de Souk-Ahras*

Les données de rayonnement solaire ne sont pas disponibles, ces informations moyennes mensuelles ont été prises par la NASA. HOMER introduit l'indice de clarté de latitude du site sélectionné (Souk-Ahras se situe à 630m de latitude), les valeurs de l'indice sont présentées dans le même tableau 5.1.

| Mois    | Clarté | Le rayonnement solaire  | La vitesse du vent |
|---------|--------|-------------------------|--------------------|
|         | index  | (kWh/m <sup>2</sup> /d) | (m/s)              |
| Janvier | 0.482  | 2.350                   | 4.3                |
| février | 0.509  | 3.165                   | 5.4                |
| mars    | 0.514  | 4.153                   | 4.8                |

|           |       |       |     |
|-----------|-------|-------|-----|
| avril     | 0.536 | 5.297 | 4.4 |
| mai       | 0.553 | 6.130 | 3.5 |
| juin      | 0.610 | 7.047 | 3.1 |
| juillet   | 0.632 | 7.138 | 3   |
| aout      | 0.634 | 6.525 | 3.1 |
| septembre | 0.588 | 5.098 | 3.4 |
| octobre   | 0.542 | 3.662 | 4.3 |
| novembre  | 0.495 | 2.558 | 4.5 |
| décembre  | 0.481 | 2.143 | 4.7 |

Tableau 5.1 Le rayonnement solaire et la vitesse du vent pour un site isolé situé à SOUK-AHRAS

HOMER crée les valeurs de rayonnement solaire chaque heure pour toute l'année voir les figure 5.6 et 5.7

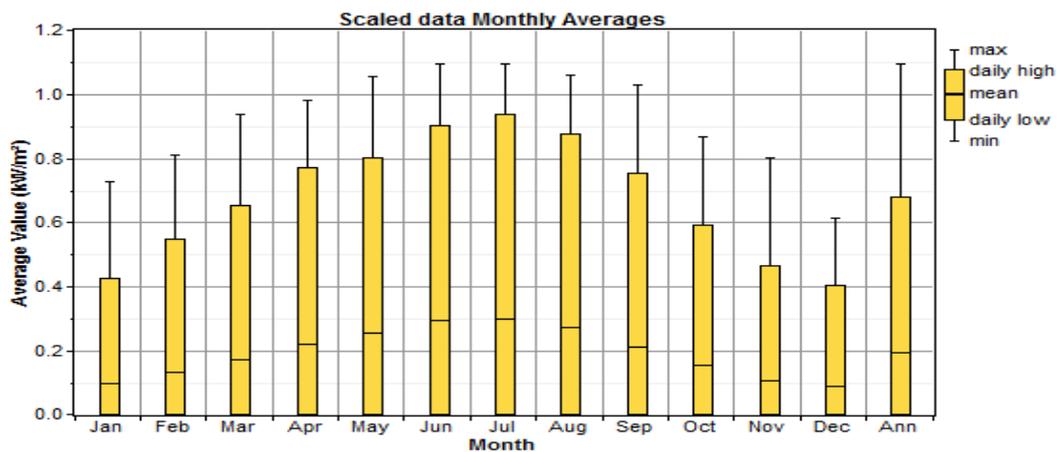


Figure 5.6 Le profil de l'éclaircment moyen mensuel

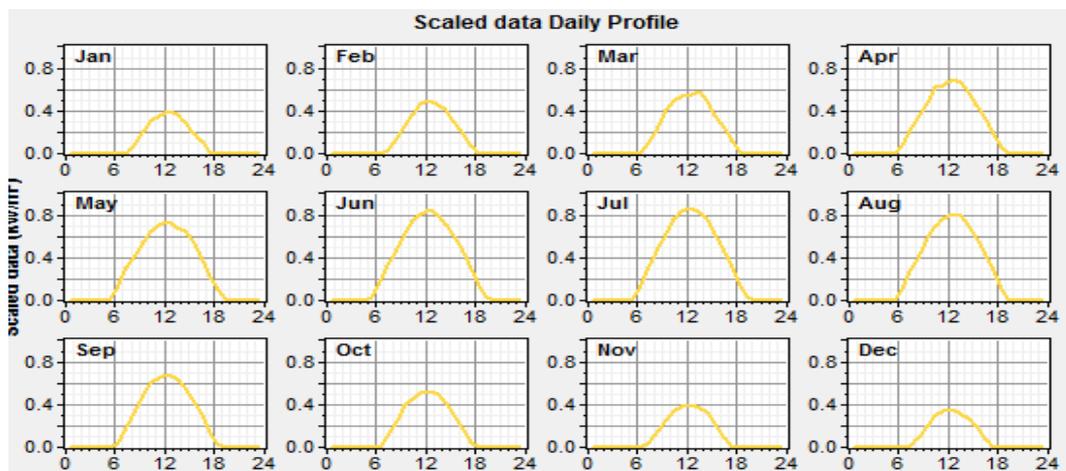


Figure 5.7 Variation d'éclaircment journalier selon les saisons

On représente dans la figure 5. 8 le profil de la vitesse du vent annuelle et dans la figure

## 5.9 la variation journalière de même vitesse.

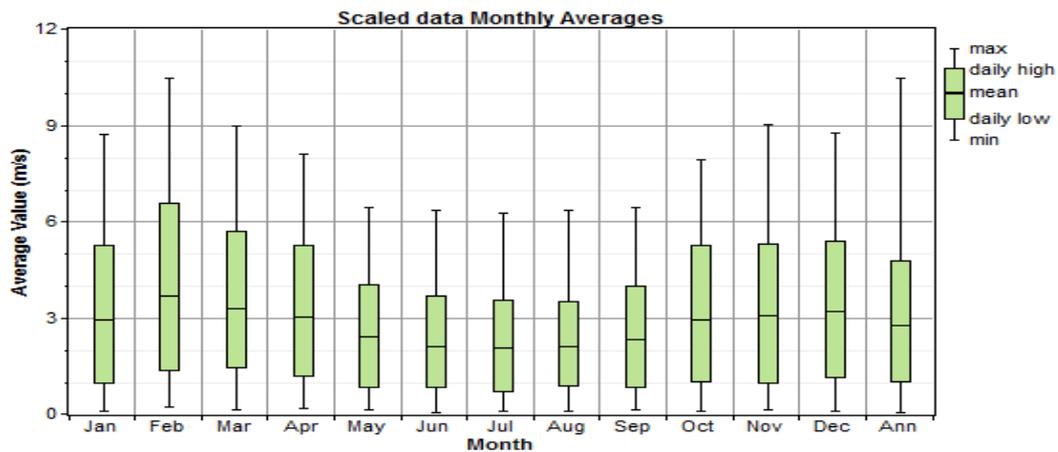


Figure 5. 8 Le profil de la vitesse du vent d'une année

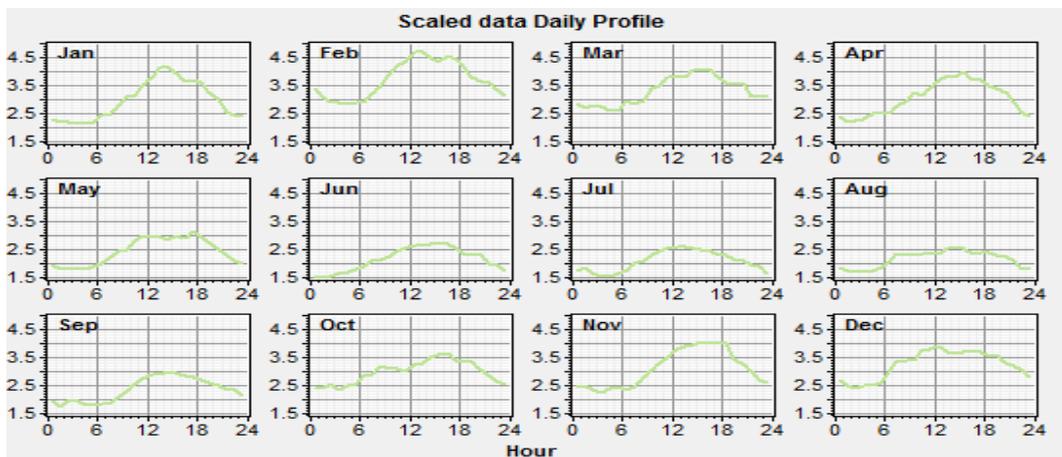


Figure 5. 9 Variation de la vitesse du vent journalière selon les saisons

## 5.3.3 Construction de système hybride de génération d'énergie :

Sur l'environnement HOMER, nous avons défini chaque élément de notre installation en se basant sur toutes les caractéristiques et les données fournies dans le paragraphe précédent. Le schéma d'un système hybride de génération d'énergie qu'on va simuler par HOMER est présenté par la figure 5.10.

Le cas d'étude :

**Charge : valeur moyenne :** 88 Kwh/j.

**Eclairement : valeur moyenne :** 4,61 Kwh/m2/j.

**Vitesse du vent, valeur moyenne :** 5,14 m/s.

**Le prix de carburant :** 14 DA/L.

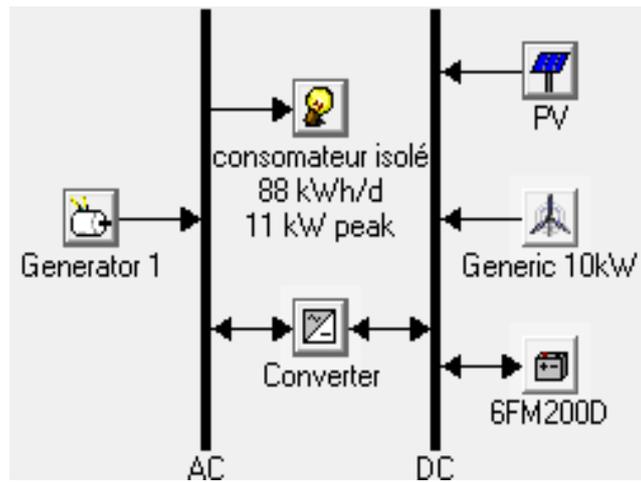


Figure 5.10 Architecture d'un système hybride

Le modèle de système hybride présenté par HOMER peut être simulé par l'introduction de nombreux facteurs telle que le coût des composants, la disponibilité des ressources. Un autre facteur majeur au niveau de cette implantation numérique est l'évaluation de long de vie du projet qui est estimé pour 25ans. Les calculs présentés par le logiciel prennent en compte des valeurs tels que le capital de l'intérêt, l'amortissement, le frais de fonctionnement, le coût du carburant... Toutes ses estimations rentrent dans le bon fonctionnement du système étudié.

**5.3.4 Simulation et interprétation :**

La simulation du système hybride par HOMER provient la combinaison optimale des éléments construisons le système. Elle est présentée selon une valeur actuelle nette (NPC) et selon différentes contraintes qui ont participés à la définition de système. Notre cas traite une simulation d'un système hybride de génération d'énergie électrique qui contient deux systèmes à énergie renouvelable photovoltaïque et éolien, et un autre système diesel, avec la présence des batteries et des convertisseurs, le système est autonome du réseau.

Dans ce cas HOMER présente le résultat de simulation comme illustré dans la figure 5.11.

|  |  |  |  |  | PV (kW) | G10 | Label (kW) | 6FM200D | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | Label (hrs) |
|---|---|---|---|---|---------|-----|------------|---------|------------|-----------------|------------------------|-----------|--------------|------------|------------|-------------|
|  |  |  |  |  | 10      | 5   | 10         | 3       | 10         | \$ 35,380       | 2,025                  | \$ 61,266 | 0.149        | 0.76       | 7,466      | 4,364       |

Figure 5.11 Résultat de simulation de système hybride par HOMER

En effet HOMER simule toutes les configurations faisables des systèmes hybrides capables de fonctionner parfaitement dans le site choisi avec la fourniture de l'énergie électrique suffisante au profil de charge et présente la configuration optimale comme suit :

- PV :** 10 Kw.
- Eolien (G10):** 5 générateurs de 10 Kw.
- Générateur diesel (label) :** 10 kw.
- Batteries (6FM200D) :** 3 lames de batteries.
- Convertisseur :** 1 seul convertisseur de 10 Kw.

Chaque générateur produit de l'énergie individuellement. L'énergie produite du système optimal est montrée dans la figure 5.12 ci-dessous.

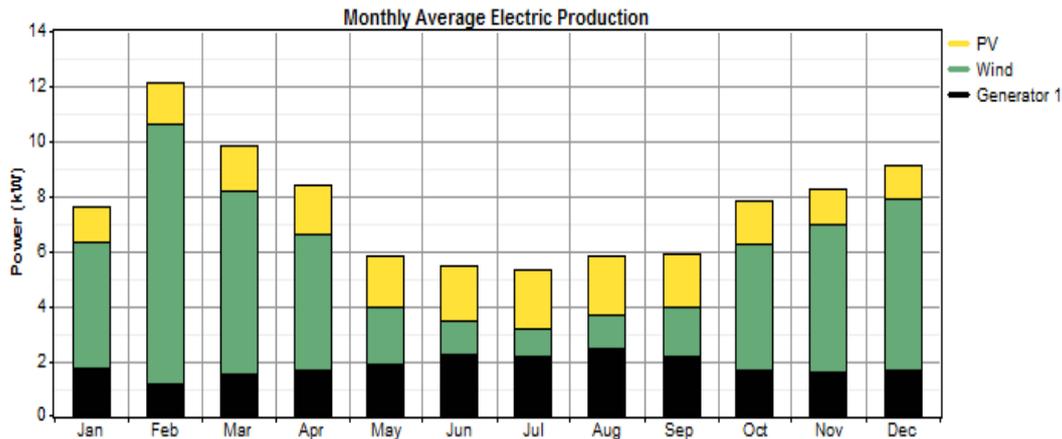


Figure 5.12 Puissance moyenne produite par chaque source

Dans les tableaux suivants, on présente des résultats approfondis pour le même système.

Le tableau 5.2 présente le taux de production d'énergie électrique pour chaque générateur tout au long de l'année.

| Production       | Kwh/ année    | %          |
|------------------|---------------|------------|
| <i>PV</i>        | <i>14,917</i> | <i>22</i>  |
| <i>Eolien</i>    | <i>32.740</i> | <i>54</i>  |
| <i>G. Diesel</i> | <i>15,900</i> | <i>24</i>  |
| <b>Total</b>     | <b>66,557</b> | <b>100</b> |

Tableau 5.2 Energie annuelle produite par chaque générateur

De la figure 5.12 et le tableau 5.2, on constate que la production de l'énergie par le système hybride optimal durant une année complète de fonctionnement présente une continuité de production d'énergie. On remarque que plus de 70% de l'énergie est produite par les générateurs à énergies renouvelables (54% pour l'éolien et 22% pour les panneaux photovoltaïques), une chose qui participe à la diminution de l'effet de serre pour notre planète. Une autre remarque constatée est la variation de la production d'énergie pour chaque générateur durant l'année, il apparaît que le générateur éolien participe avec une grande

puissance produite dans la saison d'automne et hiver ; cette puissance se diminue avec la diminution de vitesse du vent dans le printemps et l'été. Cependant la production de générateur photovoltaïque augmente par la présence d'éclairement important. La production du générateur diesel s'augmente dans le même effet pour satisfaire la demande d'énergie de la charge. L'étude de production d'énergie pour chaque générateur est illustrée comme suit.

#### 5.3.4.1 Le générateur photovoltaïque :

Les paramètres de fonctionnement de panneau photovoltaïque sont montrés dans le tableau suivant :

| Variable                             | Valeur              |
|--------------------------------------|---------------------|
| <i>Heure de fonctionnement</i>       | <i>4381 h/année</i> |
| <i>Puissance moyenne produite</i>    | <i>1,7KW</i>        |
| <i>Puissance maximale produite</i>   | <i>10,4KW</i>       |
| <i>Pénétration de PV</i>             | <i>46,9%</i>        |
| <i>Total de production d'énergie</i> | <i>14,917Kwh/an</i> |

Tableau 5.3 Information concernant la production d'énergie par le GP

La figure 5.13 présente une présentation **DMAP** de production d'énergie par le GP, ce type de graphe met en évidence un an de données horaires, chaque heure de l'année est présentée par une couleur qui simule une information précise d'une valeur de données. Cette présentation permet de voir plus clairement les informations utiles pour une interprétation facile et concrète.

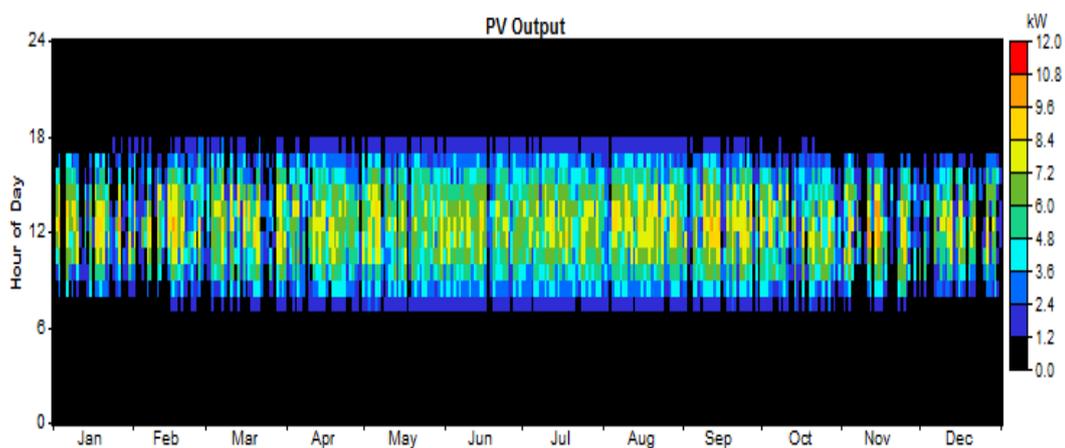


Figure 5.13 DMAP de production horaire par le GP

On peut remarquer que la période de fonctionnement de GP est bornée dans les mois d'hiver entre 7h du matin au 17h, et inversement dans la saison d'été cette limite se stabilise

entre 6 du matin jusqu'au 18h. La production des GP est nulle dans l'heure pointe selon le profil de charge journalière à 20h (voir la figure 5.4), ce qui introduit en parallèle le fonctionnement d'autres générateurs ou bien le recours d'énergie stockée dans les batteries pour répondre au demande de charge.

#### 5.3.4.2 Le générateur éolien :

Les paramètres de fonctionnement de générateur éolien sont montrés dans le tableau suivant :

| Variable                             | Valeur               |
|--------------------------------------|----------------------|
| <i>Heure de fonctionnement</i>       | <i>6107 h/année</i>  |
| <i>Puissance moyenne produite</i>    | <i>4,1 Kw</i>        |
| <i>Puissance maximale produite</i>   | <i>9,41 Kw</i>       |
| <i>Pénétration de l'éolien</i>       | <i>111%</i>          |
| <i>Total de production d'énergie</i> | <i>35,740 Kwh/an</i> |

Tableau 5.4 Information concernant la production de l'énergie éolienne

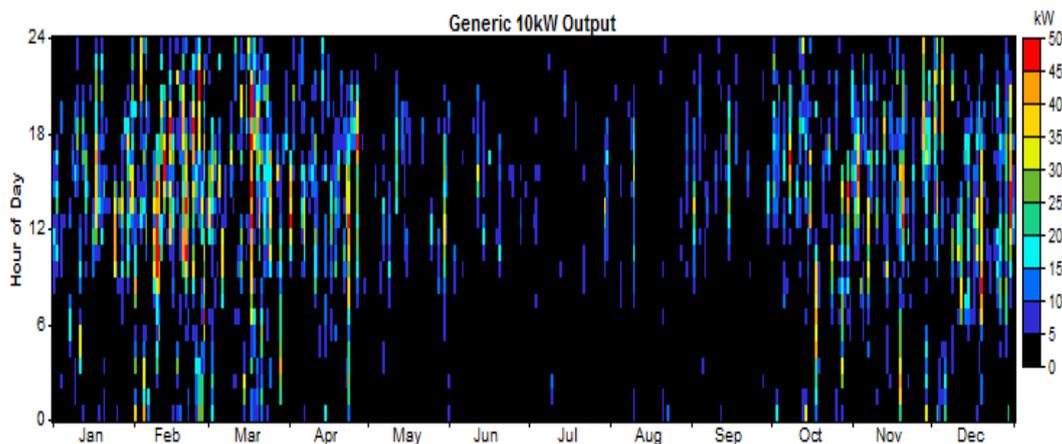


Figure 5.14 DMAP de production horaire par l'éolien

Comme illustré dans la figure 5.14, le générateur éolien fonctionne toute la journée, ce qui est bien montré dans le graphe **DMAP**. La production de l'énergie éolienne se bénéficie des grandes valeurs tout le long des mois d'automne et d'hiver, ce qui est bien traduit avec des couleurs bien clair, contrairement au mois du printemps et d'été où la vitesse de vent se diminue, la production éolienne se diminue en parallèle.

#### 5.3.4.3 Le générateur diesel :

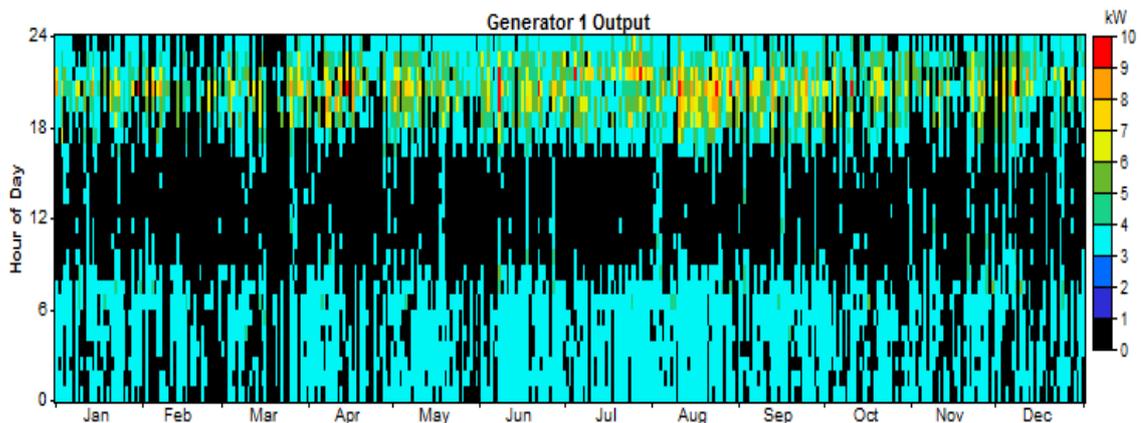
Les paramètres de fonctionnement de GD sont montrés dans le tableau suivant :

| Variable                                   | Valeur               |
|--|----------------------|
| <i>Heur de fonctionnement</i>              | <i>4364 h/année</i>  |
| <i>Puissance moyenne produite</i>          | <i>3,64 KW</i>       |
| <i>Puissance maximale produite</i>         | <i>10 Kw</i>         |
| <i>Carburant utilisé annuellement</i>      | <i>7464 L/an</i>     |
| <i>Utilisation spécifique du carburant</i> | <i>0,470 L/Kwh</i>   |
| <i>Total de production d'énergie</i>       | <i>15,900 Kwh/an</i> |

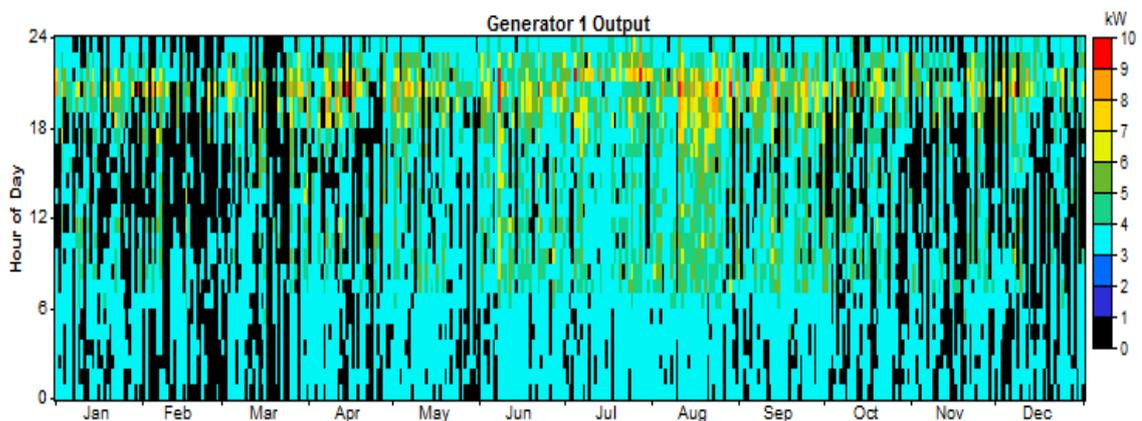
*Tableau 5.5 Information concernant la production de l'énergie par le GD*

Dans la suite et a l'objectif de voir la différence dans la consommation de carburant par le GD, on va faire une comparaison entre trois représentations **DMAP** de production d'énergie d'un GD installé dans trois systèmes hybrides différents :

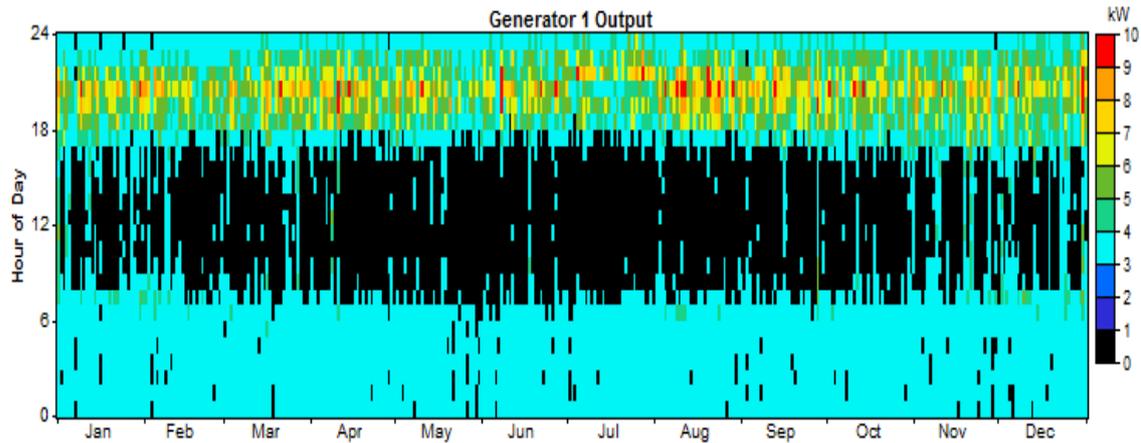
- 1- Un SH éolien-PV-diesel.
- 2- Un SH éolien-diesel.
- 3- Un SH PV-diesel.



*Figure 5.15 Dmap de production horaire par le GD pour un système éolien-PV-diesel*



*Figure 5.16 Dmap de production horaire par le GD pour un système éolien-diesel*



*Figure 5.17 Dmap de production horaire par le GD pour un système PV-diesel*

Comme illustré dans les figures ci-dessus (figure 5.15, figure 5.16, figure 5.17), la génération d'énergie par le GD diffère d'un système hybride à un autre. L'objectif de la comparaison est la mise en place pour voir la nécessité de l'utilisation des systèmes de générations d'énergies basés sur les énergies renouvelables en parallèle avec le fonctionnement du GD pour but de minimiser l'utilisation de combustible fossile.

On remarque que plus qu'on ajoute des générateurs renouvelables plus qu'on diminue l'utilisation de combustible pour la génération d'énergie électrique.

Une autre conclusion qu'on la prend de la simulation globale d'un système hybride par HOMER est que le critère financier joue un rôle important dans le mécanisme de construction de système. Avec le coût élevé des panneaux solaires et leur production minimale en comparaison avec le générateur éolien dans le site de Souk-Ahras, on va baser sur l'étude d'un système hybride éolien-diesel qui peut satisfaire la demande de charge d'une manière faisable et participe à la diminution de coût d'installation.

Dans ce qui, on s'intéresse à étudier le bon fonctionnement d'un système hybride éolien – diesel pour la génération d'énergie par le logiciel Matlab/Simulink.

## **5.4 SYSTEME HYBRIDE EOLIEN-DIESEL :**

### **5.4.1 Principe de fonctionnement d'un système hybride éolien diesel :**

La Figure 5.18 montre la structure générale d'un système hybride éolien diesel (SHÉD). Le vent construit l'élément dominateur. Si la vitesse du vent est suffisante, l'éolien alimentera seule la charge primaire. Le surplus de puissance est envoyé vers la charge secondaire. Cependant la régulation de la fréquence est assurée par cette même charge secondaire dans le cas de ce mode de fonctionnement. Durant ce fonctionnement, le moteur diesel se déconnecte

automatiquement de la génératrice synchrone par un embrayage. Le générateur synchrone fonctionne ainsi comme un condensateur synchrone en fournissant de la puissance réactive dans l'objectif de maintenir la tension d'alimentation constante. Dans le cas où la vitesse du vent est moins forte, l'éolienne produisant peu de puissance, cette dernière est incapable d'alimenter totalement la charge, alors le générateur diesel interviendra en fournissant la puissance requise. Si la vitesse du vent est très faible, le GD alimente seul toute la charge. Dans ce cas, le GD assure seul la régulation de la tension et la fréquence.

#### 5.4.2 Configuration et simulation du modèle :

Le système quand va étudier est illustré dans la Figure 5.18.

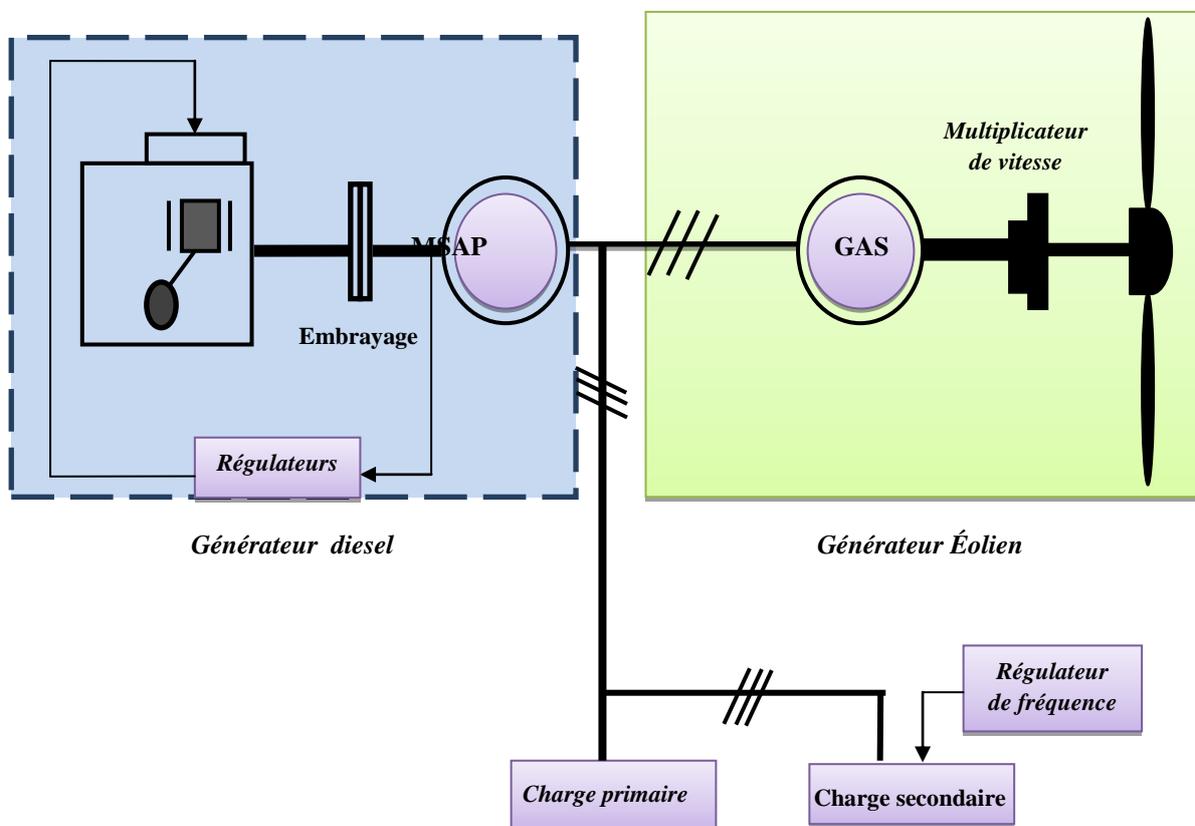


Figure 5.18 Système hybride éolien diesel

Dans notre configuration le système fournit de l'énergie électrique à l'aide d'un système éolien constitué par une turbine reliée avec une génératrice asynchrone d'une puissance apparente de 250kVA et un autre système diesel qui est constitué par un moteur diesel relié à une génératrice synchrone à aimant permanent d'une puissance apparente de 300kVA, qui fournit du réactif nécessaire pour amorcer la génératrice asynchrone. Ce système hybride de

génération d'énergie, alimente une charge principale de 250kW et une charge secondaire variable entre le 0 et 400kW associé à un régulateur de fréquence. Le système fonctionne sur une tension de 380V et une fréquence de 50Hz.

Le temps de simulation est de 10s avec une période d'échantillonnage de 1ms. La charge primaire étant 100kW jusqu'à t=3s, à cet instant on ajoute une autre charge pour atteindre une totalité de 250kW (Figure 5.19).

Le vent est simulé par sa valeur réelle.

Les résultats de simulation sont montrés sur les figures ci-dessous.

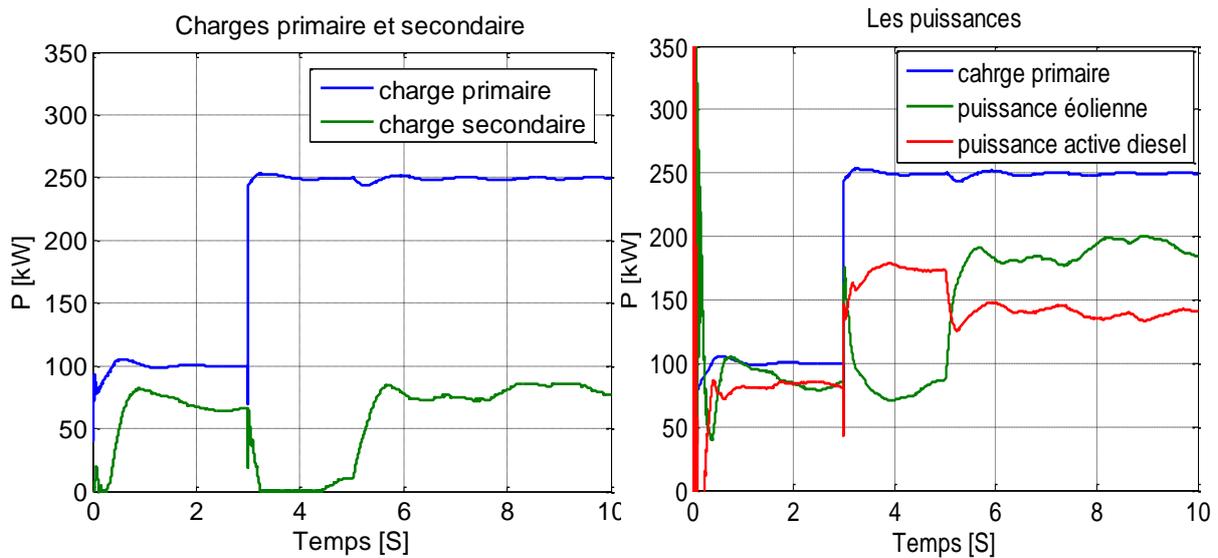


Figure 5.19 Puissance de la charge Figure 5. 20 Puissance de charge et de SHED

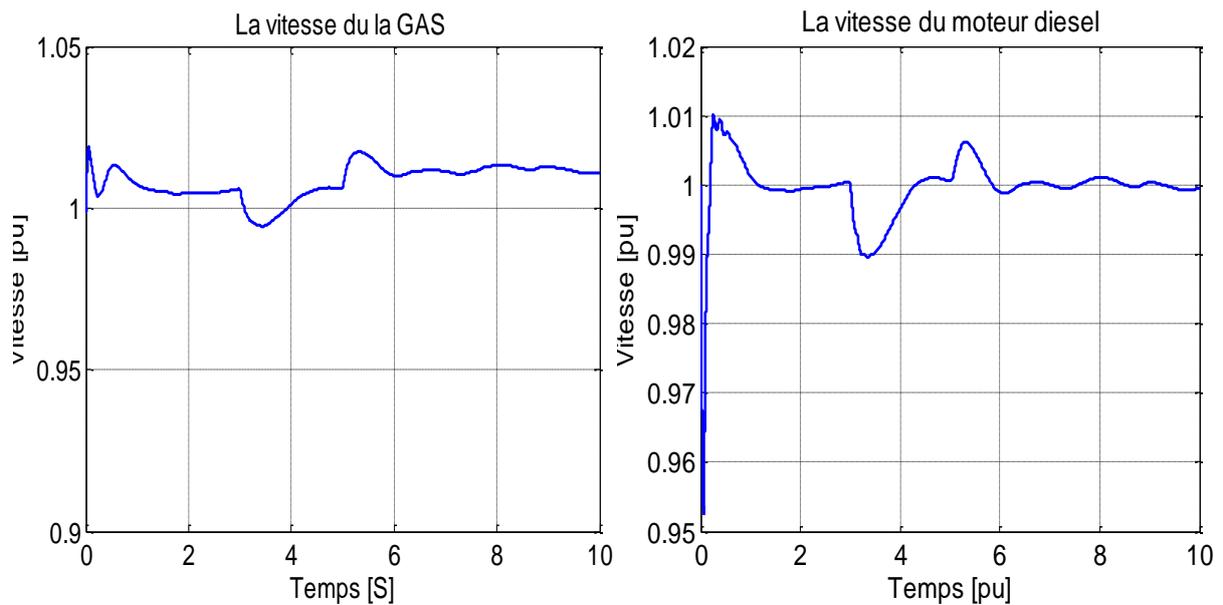


Figure 5. 21 Vitesse de la GAS Figure 5. 22 Vitesse du moteur diesel

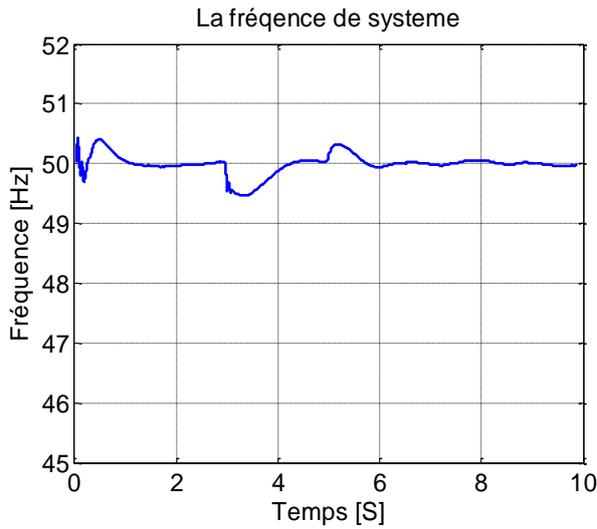


Figure 5.23 Fréquence du système hybride

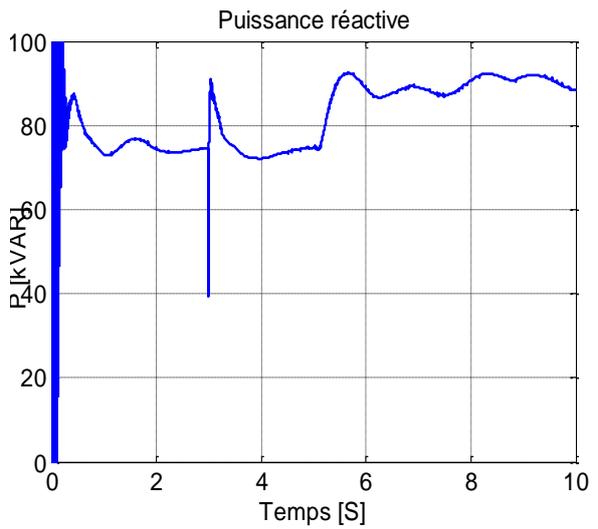


Figure 5.24 Puissance réactive générée GD

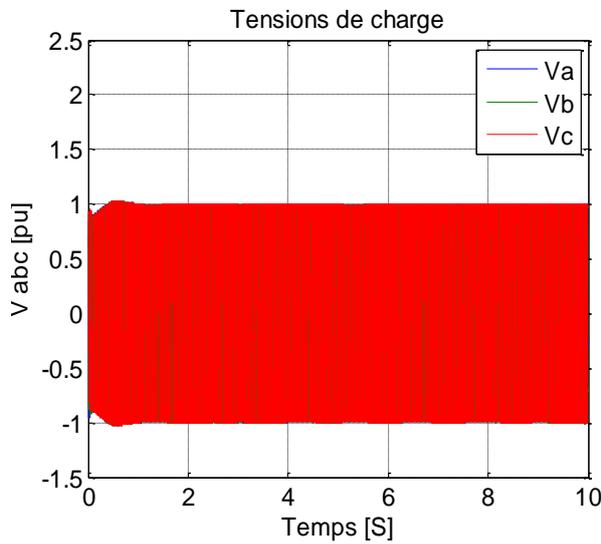


Figure 5.25 Les tensions de la charge

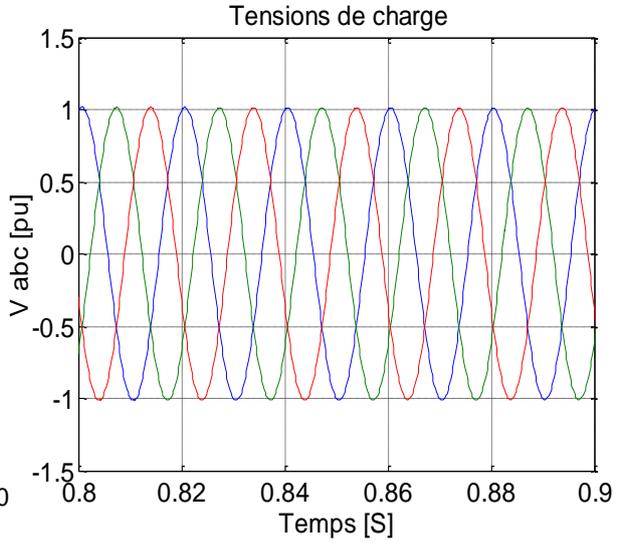


Figure 5.26 Zoom des tensions de la charge

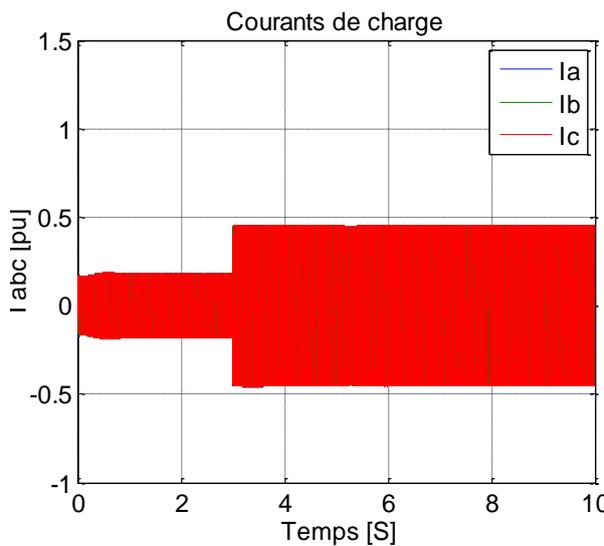


Figure 5.27 Les courants de charge

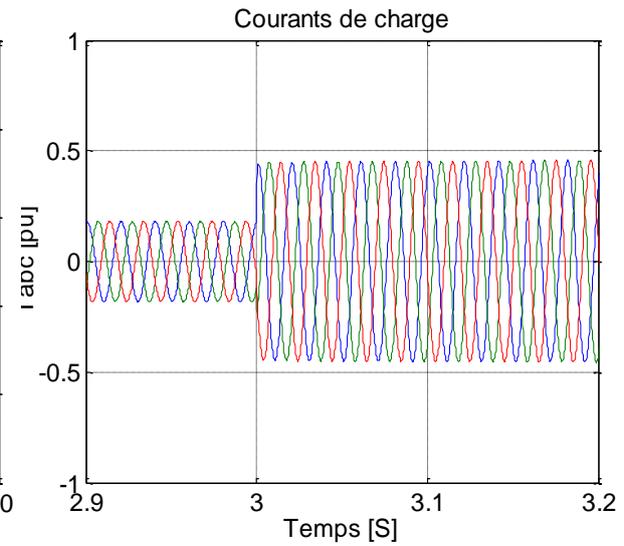


Figure 5.28 Zoom des courants de charge

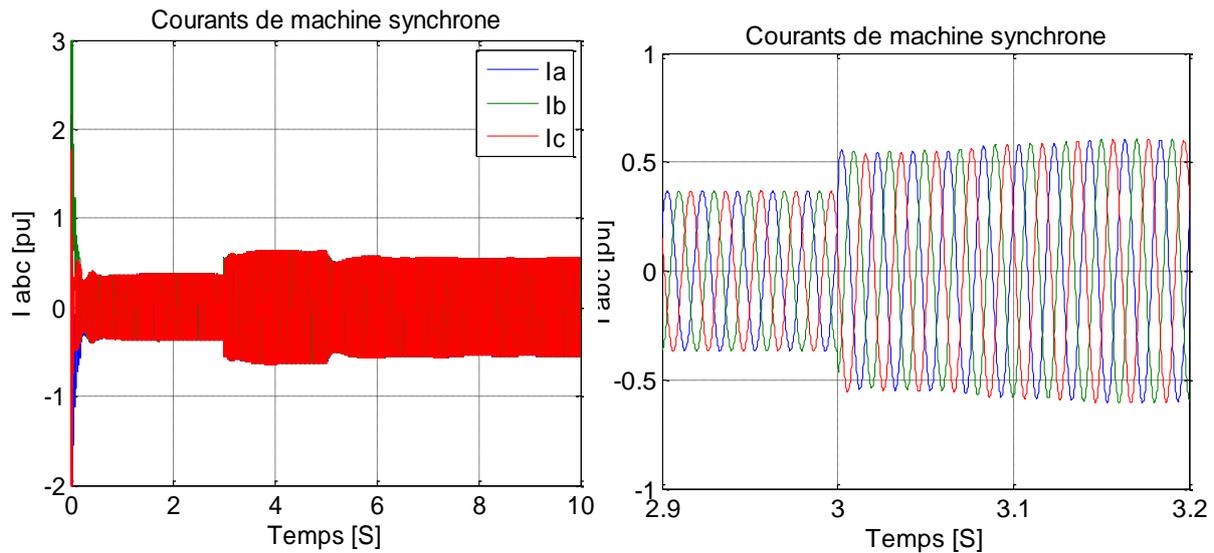


Figure 5.29 Les courants de GD Figure 5.30 Zoom des courants de GD

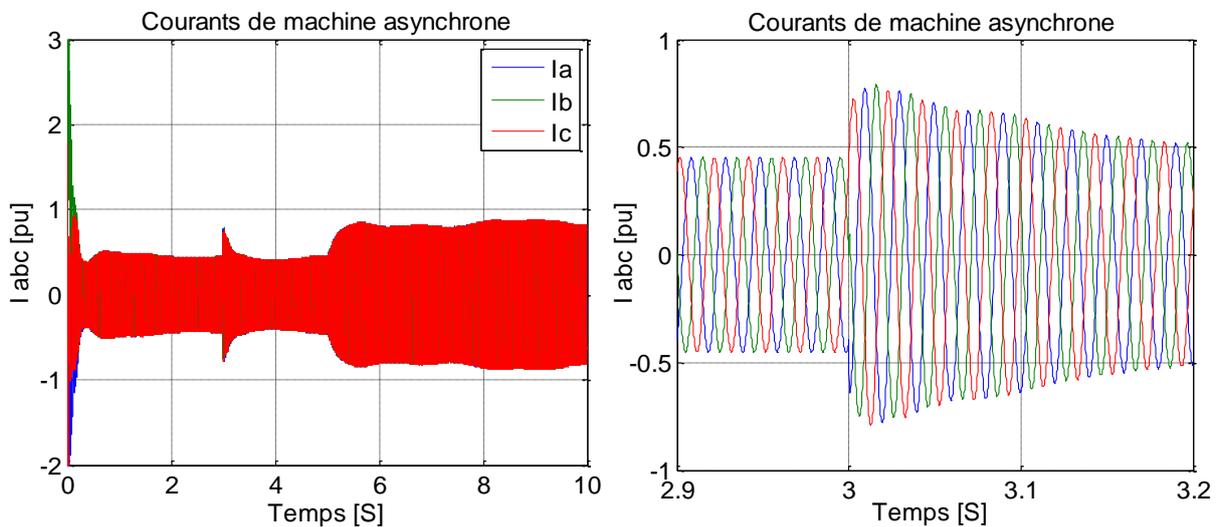


Figure 5.29 Les courants de l'éolienne Figure 5.30 Zoom des courants de l'éolienne

D'après les résultats obtenus on remarque que, la GAS reliée à la turbine fonctionne à une vitesse qui est légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme (figure 5.21).

On remarque qu'à l'instant  $t=3s$  la puissance totale de la charge est de 250kW et selon la caractéristique de la turbine, pour une vitesse de vent à 8m/s, la puissance générée par le générateur éolien est de 100kW, cette dernière est inférieure à la puissance totale de la charge, pour cela et à cet instant la puissance générée par le groupe diesel augmente (figure 5.20) afin de satisfaire la demande.

Dans la même figure à l'instant  $t=5s$ , on remarque que si la vitesse du vent augmente de [0 à 10m/s], la puissance fournie par le système éolien augmente, la puissance fournie par le groupe diesel diminue, ce qui entraîne une diminution de la consommation du carburant s'accompagnent à une diminution proportionnelle des émissions de gaz toxiques ( gaz à effet

de serre) et inversement si la vitesse du vent diminue la puissance de la GAS diminue, la puissance de groupe diesel augmente pour garantir la puissance demandée par la charge. La vitesse du moteur diesel est toujours maintenue constante (figure 5.22).

La figure 5.24 montre la puissance réactive nécessaire générée par le système diesel afin d'amorcer la génératrice asynchrone.

Les tensions et les courants de la charge gardent ses formes sinusoïdales voir (figure 5.25, figure 5.27).

La figure 5.23 montre que le régulateur de fréquence maintient la fréquence de la charge à autour 50Hz, après la variation dans la charge, ce qui garantit une stabilité de système.

La régulation de la fréquence et de tension est assurée respectivement par la charge secondaire et le régulateur de tension du moteur diesel.

La complexité du système à savoir l'ajout d'autres générateurs d'énergie en parallèle avec le générateur diesel nécessite l'application d'un système de commande capable de garantir le contrôle idéal de la production d'énergie de tous les composants, Le Matlab/Simulink toujours nous permet de le faire dans des futurs travaux de recherches.

## 5.5 CONCLUSION :

Dans ce chapitre une brève description d'un système hybride de génération de l'énergie électrique est réalisée, les principales notions liées au type d'architecture de système ont été aussi présentés. Deux applications d'un système hybride ont été élaborés, une première sur l'environnement HOMER pour une optimisation d'un système hybride au site de la ville de Souk Ahars, ou les données métrologiques comme le rayonnement solaire et la vitesse du vent sont disponibles, un deuxième sous l'interface Simulink du Matlab pour un système hybride éolien diesel. D'après les résultats, on remarque que la combinaison des sources d'énergie renouvelables dans la présence d'une source classique d'origine fossile à un avantage remarquable dans la diminution de l'utilisation de cette dernière, afin de diminuer l'émission de gaz à effet de serre, en plus la diversité des ressources énergétiques que présente un système hybride, la continuité et la disponibilité de la production d'énergie électrique est assurée.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Le but du travail présenté dans ce mémoire, est l'étude des systèmes hybrides de génération de l'énergie électrique pour l'alimentation des sites isolés, avec comme objectif de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal de systèmes hybrides afin de réduire les émissions des gaz à effets serre.

Dans le premier chapitre on a dressé un rappel sur les différents types des énergies renouvelables suivi par un état de l'art sur les systèmes hybrides de génération d'énergie électrique ainsi que les différents éléments qui les construisent.

Dans le deuxième chapitre on a présenté la modélisation du groupe diesel pour une vitesse constante, en tenant compte du moteur diesel et la génératrice synchrone à aimant permanent. Des simulations numériques sur Matlab-Simulink du groupe diesel qui alimente une charge variable ont été présentées.

Par la suite on a consacré le troisième chapitre à l'étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, avec une description des différents types des générateurs électriques utilisés dans un système de conversion éolien, pour notre chaîne de conversion on a choisi la génératrice asynchrone à cage d'écureuil grâce à ces avantages par rapport aux autres types de machines. Le modèle de la chaîne de conversion éolienne a été implanté sous l'environnement Matlab/Simulink, afin d'étaler le bon fonctionnement du système aux variations des contraintes météorologiques.

L'étude de générateur photovoltaïque a été présentée dans le quatrième chapitre. Dans la première partie, nous avons présenté les différentes architectures des cellules photovoltaïques et leur implantation dans la construction des panneaux. Dans la deuxième partie nous avons approché à une modélisation et des simulations numériques des panneaux photovoltaïques dans le cadre d'étude de l'influence de l'éclairement, la température et les paramètres internes sur le fonctionnement des cellules.

Dans le dernier chapitre nous avons présenté une étude de simulation pour un système hybride éolien diesel photovoltaïque avec la présence des batteries et des convertisseurs, pour l'alimentation d'une charge donnée dans un concept autonome. La simulation est faite par le logiciel HOMER, qui nous permet de traiter des résultats réels basés sur des contraintes de coût et de variations d'entrées météorologiques d'un site situé dans la ville de Souk-Ahras. Les résultats obtenues favorisent la production éolienne dans ce site isolé, et permet de nous donner l'avantage d'étudier profondément le fonctionnement d'un système éolien-diesel qui satisfait nos besoins de l'énergie dans les régions éloignées de ville Souk-Ahras par le

logiciel Matlab/Simulink.

D'une manière générale le travail présenté dans ce mémoire nous a permis de montrer l'intérêt que suscitent les énergies renouvelables dans notre pays l'Algérie. Néanmoins, tous ces résultats n'excluent pas des améliorations qui peuvent être apportées dans le futur de notre travail. Il s'agit en fait des points suivants :

- L'étude des commandes avancées pour l'implantation des systèmes hybrides afin d'améliorer la qualité d'énergie.
- Développement et mise en œuvre d'un banc d'essai d'un système hybride éolien-diesel.
- Une intégration d'un système hybride éolien- diesel- photovoltaïque dans notre ville de Souk-Ahras avec le suivi du point de puissance maximale (MPPT : Maximum Power Point Tracking).

# **BIBLIOGRAPHIE**

- 
- [1] M. Lopez, “ *Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien Pour une Unité de Production Isolée* ”, Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, 2008.
- [2] O. Gergaud, “ *Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et associé à un Accumulateur*”, Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2002.
- [3] R.Chedid and S.Rahman, “ *Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Power Systems*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 1, March 1997.
- [4] M. Muralikrishnan and V. Lakshminarayana, “ *Hybrid (Solar and Wind) Energy System for Rural Electrification* ”, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 3, No. 5, October 2008.
- [5] I. Vechiu, “ *Modelisation et Analyse de l'Intégration de des Energies Renouvelables Dans un Réseau Autonome* ”, Thèse de Doctorat, Université de Havre, Année 2005.
- [6] F. Baghdadi, “ *Modélisation et Simulation des Performances d'une Installation Hybride de conversion d'Energies Renouvelables* ”, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [7] S. Benreguia, “ *Techniques de production de l'électricité en Algérie : Dominance des combustibles fossiles*”, Portail Algérien des Energies Renouvelables, août 2012.
- [8] B.S. Borowy and Z. M. Salameh, “ *Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, June 1996
- [9] H.Yang, W.Zhou, L.Lu and Z.Fang, “ *Optimal Sizing Method for Stand Alone Hybrid Solar–Wind System with LPSP technology by using Genetic Algorithm* ”, Solar Energy 82, pp. 354-367, 2008.
- [10] F. Brihmat, “ *L'étude Conceptuelle d'un Système de Conditionnement de puissance pour une Centrale de hybride PV/Eolien* ”, Mémoire de Magistère, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [11] M. Adel, “ *Les vrais défis de l'Algérie* ”, Portail Algérien des Energies Renouvelables, Septembre 2012.
- [12] C. Darras, “ *Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE*”, Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, May 2011.
- [13] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed and H. Benalla, “ *Modélisation, Simulation et Contrôle d'une Turbine Eolienne à Vitesse Variable basée sur la Génératrice Asynchrone à double alimentation* ”, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14 N°1, pp. 109-120, 2011.
- [14] A. Mirecki, “ *Etude comparative de Chaînes de Conversion d'Energie dédiées à une Eolienne de petite puissance*”, Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [15] S. Haffen, “ *Caractéristiques Géothermiques du Réservoir Gréseux du Buntsandstein d'Alsace*”, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, Septembre 2012.
-

- 
- [16] La grenelle de la mer, “ *Le Livre Bleu des engagements du Grenelle de la Mer*”, Année 2009.
- [17] T. Zhou, “ *Commande et Supervision Energétique d’un Générateur Hybride Actif Eolien incluant du Stockage sous forme d’Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l’Intégration dans le Système Electrique d’un Micro Réseau* ”, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2009.
- [18] M. Elhassan, M. Fauzi, K. Sopian and A. A. Abass, “ *Design and Performance of Photovoltaic power System as a Renewable Energy Source for Residential in Khartoum*”, International Journal of the Physical Sciences Vol. 7(25), pp. 4036-4042, June 2012.
- [19] A. Das and V. Balakrishnan, “ *Optimized Hybrid Renewable Energy System of Isolated Islands in Smart-Grid scenario-A Case Study in Indian Context* ”, World Academy of Science, Engineering and Technology 67, 2012.
- [20] E. A. Al-Ammar, N. H. Malik and M. Usman, “ *Application of Using Hybrid Renewable Energy in Saudi Arabia* ”, ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 1, pp. 84-89, 2011.
- [21] D. Rekioua, Z. Roumila and T. Rekioua, “ *Etude d’une centrale Hybride Photovoltaïque - Eolien – Diesel* ” Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°4, pp. 623-633, 2008.
- [22] W.D. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan and V. Gerez, “ *Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand-Alone Wind, Photovoltaic, and Hybrid Wind PV Systems*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 1, March 1998.
- [23] N. Oleksiy, “ *Simulation, Fabrication et Analyse de Cellules Photovoltaïques à Contacts Arrières Interdigités* ”, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [24] T. R. Mtshali, G. Coppez, S.Chowdhury and S.P. Chowdhury “ *Simulation and Modelling of PV-Wind-Battery Hybrid Power System* ”, july 2011.
- [25] Victron energy, “ *Systèmes sites isolés Systèmes de secours* ”, Energie en tout temps en tout lieu.
- [26] I.A. Adejumobi, S.G. Oyagbinrin, F. G. Akinboro and M.B. Olajide, “ *Hybrid Solar and Wind Power: an Essential for Information Communication Technology Infrastructure and People in Rural Communities* ”, IJRRAS 9 (1), October 2011.
- [27] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, “ *Optimum Photovoltaic Array Size for a Hybrid Wind/PV System* ”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 3, September 1994.
- [28] T. Jacob and S. Arun, “ *Modeling of Hybrid Wind and Photovoltaic Energy System using a New Converter Topology* ”, Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (EEEIJ) Vol.1, No.2, August 2012.
- [29] S. Rehman, Md. Mahbub Alam, J.P. Meyer and L. M. Al-Hadhrami, “ *Feasibility study of a Wind-PV-Diesel Hybrid Power System for a village* ”, Renewable Energy 38, pp. 258-268, 2012.
-

- [30] M. S. Ngan and C. W. Tan, “ *Assessment of Economic Viability for PV / wind/ diesel Hybrid Energy System in Southern Peninsular Malaysia* ”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp.634-647, 2012.
- [31] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud and I.Youm, “ *Modélisation d'un système de Stockage Intégré dans un système Hybride (PV / Eolien / Diesel)* ”, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°2, pp.205-214, 2007.
- [32] A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen and S. Moussa, “ *Optimisation d'un système Hybride (Eolien – Photovoltaïque) totalement autonome* ”, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 9 N.3, pp. 199-209, 2006.
- [33] H. Ibrahim, “ *Etude et Conception d'un Générateur Hybride d'Electricité de Type Eolien-Diesel avec Elément de Stockage d'Air Comprimé* ”, Thèse de Doctorat, Université de Québec, Juin 2010.
- [34] E. Muljadi and H.E. McKenna, “ *Power Quality Issues in aHybrid Power System* ”, National Renewable Energy Laboratory, September 2001.
- [35] A. Mokhtari, “ *Diagnostic des Systèmes Hybrides : Développement d'une Méthode Associant la Détection par Classification et la Simulation Dynamique* ”, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Octobre 2007.
- [36] B. Tounsi, “ *Etude comparative de Groupes Electrogènes embarqués à large gamme de vitesse variable associant Mmachines à Aimants Permanents et conversion statique* ”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique Toulouze, 2007.
- [37] S. Torigo, Y. Kawagoe, K. Nakamura, K. Kiyokawa and S.OHTA, “ *Cogeneration Systems using a Diesel Engine Generator for Telecommunications Power Plants* ”, DC Generators, Tokyou Japon.
- [38] M. Desbazeille, “ *Diagnostic de Groupes Electrogènes Diesel par Analyse de la Vitesse de Rotation du Vilebrequin* ”, Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet, Juillet 2010.
- [39] H. Wei, R. Min and T. Yingqi, “ *A Fuzzy Control System of Diesel Generator Speed* ”, University Zhuhai.
- [40] M. J. Ryan and R. D. Lorenz, “ *A Power-Mapping” Variable-Speed Control Technique for a Constant-Frequency Conversion System powered by a IC Engine and PM Generator* ”, Conference Record of the 2000 IEEE, pp. 2376-2382 vol.4, Rome October 2000.
- [41] J. H. Lee, S. H. Lee and S. Sul, “ *Variable Speed Engine Generator with Super-Capacitor; Isolated Power Generation System and Fuel Efficiency* ”, *Industry Applications*, IEEE Transactions on Vol. 45, pp. 2130-2135, septembre 2009.
- [42] D.H. Wang, C.V. Nayar and C. Wang, “ *Modeling of Stand-alone Variable Speed Diesel Generator using Doubly-Fed Induction Generator* ”, 2010 2<sup>nd</sup> IEEE International symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems.
- [43] A. K. Jain, V. T. Ranganathan, K. Vijay Kumar and G. Guruswamy, “ *Diesel Engine Driven Stand-Alone Variable Speed Constant Frequency Slip Ring Induction Generator - Theory and Experimental Results* ”, NPEC 2010.
- [44] B. Colin, “ *Groupes Electrogènes de Secours* ”, *Technique d'Ingénieur* D5180, février 1998

- 
- [45] H. Nordin, “ *System Reliability, Dimensioning and Environmental Impact of Diesel Engine Generator Sets used in Telecom Applications* ”, Lindemark, Ericsson Components, Sweden.
- [46] M. Rezkallah, “ *Amélioration de la Qualité d’Energie fournie au Réseau Autonome Hybride Eolien- Diesel* ”, Mémoire présenté à l’École de Technologie Supérieur, Montréal 2010.
- [47] F. Boudy, “ *Etude du Systeme d’Injection d’un Moteur Diesel a Rampe d’Injection Commune* ”, Mémoire présenté à l’École de Technologie Supérieur, Montréal 208.
- [48] M. Khov, “ *Surveillance et Diagnostic des Machines Synchrones à Aimants Permanents : Détection des courts-circuits par suivi paramétrique* ”, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Décembre 2009.
- [49] S. Belakehal, “ *Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables* ”, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Juin 2010.
- [50] Y. Hu, M. McCormick, L. Haydock, M. Cirstea and G. A. Putrus, “ *Advanced Hybrid Variable Speed Controller For Stand-Alone Diesel Engine Driven Generator Systems* ”, Power System Technology Conference, vol.2, pp.711-715, 2002.
- [51] Y. Hu and M. McCormick, “ *A FPGA Based Fast DC Link Voltage Controller for Stand-Alone Diesel Engine Driven Generattor Systems* ”, IEEE 28th Annual Conference, vol.3, pp. 1966-1971, 2002.
- [52] C. Zhe, “ *Advanced Wind Energy Convertors using Electronic Power Conversion* ”, These from Durham University, 1997.
- [53] J.Chen and D.Jiang, “ *Study on Modeling and Simulation of Non grid connected Wind Turbine* ”, World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, September 2009.
- [54] Word Wind Energy Association, “ *2013 Small Wind Word Report Update* ”, April 2013
- [55] Le ministère de l’Energie et des Mines “ *Programme des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique* ”, Algérie, Mars 2011.
- [56] L. Hamane, “ *Bulletin des Energies Renouvelables* ”, Centre de Développement des Energies Renouvelables CDER, Juin 2003, Algérie.
- [57] F. Poitiers, “ *Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l’Utilisation de l’Energie Eolienne* ”, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 2003.
- [58] A. Abdulrazek, “ *Design and Power Characterization of a Small Wind Turbine Model in Partial Load Region* ”, Master of Science in Engineering Renewable, University of Kassel and Cairo University, February 2012.
- [59] K. Idjdarene, “ *Contribution à l’Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones a Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes* ”, Thèse de Doctorat, Université Abderrahmane Mira Béjaa, Mai 2010.
- [60] N. Khezami, “ *Commande Multi Modèle Optimale des Eoliennes : Application à la participation des Eoliennes au Réglage de la Fréquence* ”, Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Octobre 2011.
-

- [61] S. Elaimani, “ *Modélisation de Différentes Technologies d’Eoliennes Intégrales Dans un Réseau de Moyenne Tension* ”, Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Décembre 2004.
- [62] F. L. Luo, “ *Design of Wind-Turbine Energy System* ”, IPEC Conference Proceedings, pp. 110-115, October 2010.
- [63] M.E. Topal and L. T. Ergene, “ *Designing a Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator* ”, ELECO 2010.
- [64] P. J. Schubel and R. J. Crossley, “ *Wind Turbine Blade Design* ”, Energies5, pp. 3425-3449, June 2012.
- [65] R. T. Cowgill, Jake Fouts, Byron Haley and Chris Whitham, “ *Wind Turbine Rotor Design* ”, 2006.
- [66] W. Dingguo and W. Zhixin, “ *Modeling and Design of Control System for Variable Speed Wind Turbine in All Operating Region* ”, International Journal of Systems Applications, Engineering and Development Issue 3, Vol. 1, 2007.
- [67] E. S. Abdin and W. Xu, “ *Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit* ”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 1, MARCH 2000.
- [68] M. Narayana and G. Putrus, “ *Optimal Control of Wind Turbine Using Neural Networks* ”, UPEC2010 31st Aug - 3rd, September 2010.
- [69] X. Zhang, X. Zhang, P. Zhou, J. Cheng, S. Jiale and Y. Liu, “ *Fuzzy Control Used in Variable Speed Wind Turbine* ”, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, China August 2009.
- [70] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug and H. Benalla, “ *Modélisation et Commande d’une Génératrice Synchrone à Aimants Permanents dédiée à la conversion de l’Energie Eolienne* ”, Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1, pp. 149-161, 2010.
- [71] O. Gergaud, B. Multonv and H. Benahmed, “ *Modélisation d’une Chaîne de Conversion Eolienne de Petite Puissance* ”, Electrotechnique du Futur, Nancy, France 2001.
- [72] K. Idjdarene, “ *Contrôle d’une Génératrice Asynchrone à Cage dédiée à la Conversion de l’Energie Eolienne* ”, JCGE'08 LYON, 16 et 17, Décembre 2008.
- [73] S. Muller, M. Deicke and W. Rik, “ *Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor* ”, Industry Applications Conference Record of the IEEE, vol.4, pp. 2249-2254, October 2010.
- [74] A. Davigny, “ *Participation Aux Services Système de Fermes d’Eoliennes a Vitesse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d’Energie* ”, Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2008.
- [75] M. Jelavić, N. Perić and I. Petrović, “ *Identification of Wind Turbine Model for Controller Design* ”, Power Electronics and Motion Control Conference 12th International, pp. 1608–1613, September 2006.

- [76] L. Krichen, B. François and A. Ouali, “ *Modélisation, Commande et Interaction de deux Eoliennes à Vitesse Variable* ”, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°2, pp. 225-230, 2007.
- [77] H. Zhang and Z. Wang, “ *Study on Modeling and Simulation of Double-Fed Induction Wind Power Generator Control System* ”, *Sustainable Power Generation and Supply International Conference*, pp. 1-5, april 2009.
- [78] R. Bharanikumar, A.C. Yazhini and A. N. Kumar, “ *Modeling and Simulation of Wind Turbine Driven Permanent Magnet Generator with New MPPT Algorithm* ”, *Asian Power Electronics Journal*, Vol. 4 No.2, August 2010.
- [79] M. G. Molina, A.G. Sanchez and A.M Rizzato lede, “ *Modelling and Simulation of Wind Farms with variable Speed Wind turbines using Full-Scalle Converters for Power System Dynamic Studies* ”, *Hidrogeno y Fuentes Sustentabl de energia*, 2011.
- [80] S. Nath and R. Somnath, “ *The Modeling and Simulation of Wind Energy Based Power System using MATLAB* ”, *International Journal of Power System Operation and Energy Management*, Issue-2, Vol. 1, pp. 2231-4407, 2011.
- [81] S. J. Chiang, K. T. Chang and C. Y. Yen, “ *Residential Photovoltaic Energy Storage System* ”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 45, No. 3, June1998.
- [82] A. Abdelli, “ *Optimisation Multicritère d’une Chaîne Eolienne Passive* ”, *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse*, 2007.
- [83] L. Louze, “ *Production Décentralisée de l’Energie Electrique : Modélisation et Contrôle d’une Génératrice Asynchrone Auto Excitée* ”, *Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine*, 2010.
- [84] A. G. Moacyr, P. Leonardo, G. Luigi and A. Carlos, “ *Research on Photovoltaics: Review, Trends and Perspectives* ”, *Power Electronics Conference (COBEP), Brazil* 2011.
- [85] F. M. González-Longatt, “ *Model of Photovoltaic Module in Matlab* ”, *2nd Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica*, 2005.
- [86] G. Grandi and G. Sancineto, “ *Hardware Modeling of Photovoltaic Panels* ”, *Department of Electrical Engineering, University of Bologna*, 2003.
- [87] S. Petibon, “ *Nouvelles Architectures Distribuées de Gestion et de Conversion de l’Energie pour les Applications Photovoltaïques* ”, *Thèse de Doctorat, Université de Toulouse*, Janvier 2009.
- [88] M. Angel, “ *Conception et Realisation de Modules Photovoltaïques Electroniques* ”, *Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse*, Septembre 2006.
- [89] J. Zhao, A. Wang, P. Campbell and M. A. Green, “ *A 19.8% Efficient Honeycomb Multicrystalline Silicon Solar Cell with Improved Light Trapping* ”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 46, No. 10, October 1999.
- [90] H. Hassini, “ *Modelisation, Simulation et Optimisation d’un Systeme Hybride Eolien-Photovoltaïque* ”, *Memoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen*, 2010.

- [91] B. Brousse, “ *Réalisation et Caractérisation de Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues par Dépôt Physique* ”, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Décembre 2004.
- [92] “ *Physique et Technologie des Composants de Puissance* ”, Université de Bordeaux.
- [93] “ *Définition de Semi-conducteur* ”, EDF ENR, Energies Nouvelles Reparties.
- [94] J. T. Bialasiewicz and E. Muljadi, “ *RPMSrm-Based Modeling of Photovoltaic Panels as Energy Sources in Renewable Energy Systems* ”, IECON 02, IEEE 2002 28th Annual Conference, vol.4, pp. 3360-3365, Novembre 2002.
- [95] G. B. Shrestha and I. Goel, “ *A study on Optimal Sizing of Stand-Alone Photovoltaic Stations* ”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 4, December 1998.
- [96] Z. M. Salameh, S. Borowy and R. A. Amin, “ *Photovoltaic Module-Site Matching Based on the Capacity Factors* ”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, June 1995.
- [97] G. Capizzi, F. Bonanno and G. M. Tina, “ *Experiences on the Design of Stand Alone Photovoltaic System by Deterministic and Probabilistic Methods* ”, Clean Electrical Power Conference(ICCEP), pp. 328-335, June 2011.
- [98] F.Z. Zerhouni, M. Zegrar and A. Boudghène, “ *Amélioration de l’Adaptation d’un Générateur Photovoltaïque à une Charge avec Implémentation Pratique* ”, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°4, pp. 551-560, Année 2007.
- [99] Comprendre l’énergie photovoltaïque, “ *Avantages et inconvénients du PV* ” : [www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com](http://www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com).
- [100] D. Petreus and C. Farcas, “ *Modelling and Simulation of Photovoltaic Cells* ”, Acta Technica Napocensis Electronics and Telecommunications, Vol. 49, N. 1, 2008.
- [101] S. Rustemli and F. Dincer, “ *Modeling of Photovoltaic Panel and Examining Effects of Temperature in Matlab/Simulink* ”, Electronics and Electrical Engineering, No. 3(109), 2011.
- [102] W. Cai, H. Ren, Y. Jiao, M. Cai and X. Cheng, “ *Analysis and Simulation for Grid-Connected PHotovoltaic SYstem BAsed on Matlab* ”, Electrical and Control Engineering (ICECE), pp. 63–66, Septembre 2011.
- [103] M. G. Villalva, J. R. Gazoli and E. R. Filho, “ *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays* ”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 5, May 2009.
- [104] H. Can, D. Ickilli and K. S. Parlak “ *A New Numerical Solution Approach for the Real-Time Modeling of Photovoltaic Panels* ”, Power and Energy Engineering Conference Asia-Pacific, pp. 1-4, March 2012.
- [105] F. Adamo, F. Attivissimo and M. Spadavecchia, “ *A Tool for Photovoltaic Panels Modeling and Testing* ”, Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1463-1466, May 2010.
- [106] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud and I. Youm, “ *Etude et Modélisation d’un Générateur Photovoltaïque* ”, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°3 pp. 473-483, Année 2008.

- 
- [107] F. Adamo, F. Attivissimo, A. Di Nisio, A. M. L. Lanzolla and M. Spadavecchia, “ *Parameters Estimation for a Model of Photovoltaic Panels* ”, *Fundamental and Applied Metrology*, pp. 6–11, Lisbon, Portugal 2009.
- [108] T. Tafticht, “ *Analyse et Commande D'un Système Hybride Photovoltaïque Éolien* ”, Thèse de Doctorat, Université du Québec, Décembre 2006.
- [109] A. Sadek, “ *Implantation Expérimentale de l'MPPT pour un Système de Génération Hybride Solaire-Eolien* ”, Mémoire de Magistère, Université de Batna, Juillet 2009.
- [110] M. Park and I. Yu, “ *A Study on the Optimal Voltage for MPPT obtained by Surface Temperature of Solar Cell* ”, The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 2004.
- [111] P.A. Stott and M.A. Mueller, “ *Modelling Fully Variable Speed Hybrid Wind Diesel Systems* ”, Universities Power Engineering Conference, pp. 212-216, september 2006.
- [112] S.S.Murthy, S. Mishra and G. Mallesham, “ *Voltage and Frequency Control of Wind Diesel Hybrid System With Variable Speed Wind Turbine* ”, Power Electronics, Drives and Energy Systems Conference, pp.1-6, India December 2010.
- [113] B. Kansara and B.R. Parekh, “ *Modelling and Simulation of Distributed Generation System Using HOMER Software* ”, International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering, 2011.
- [114] James H. Taylor and D. Kebede, “ *Modeling and Simulation of Hybrid Systems* ”, Proceedings of the 34th Conference on Decision & Control New Orleans, December 1995.
- [115] J. Kaseera, A. Chaplot and J. K. Maherchandani, “ *Modeling and Simulation of Wind-PV Hybrid Power System using MATLAB/Simulink* ”, IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, 2012.
- [116] National Renewable Energy Laboratory (NREL), “ *HOMER theMircropower Optimization Model Fact Sheet* ”, pp. 1-2, 2005.

# **ANNEXES**

## 1. ANNEXE 1 :

Dans l'annexe 1, on va trouver un modèle diphasé de la machine asynchrone à cage d'écureuil, cette tâche nous permet de bien représenter le comportement de la machine au niveau de simulation.

Ce modèle tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- La caractéristique magnétique de la machine linéaire (circuit magnétique non saturé). Les valeurs des inductances propres et mutuelles sont indépendantes des intensités des courants. Les pertes dans le fer sont nulles.
- La variation des résistances des enroulements en fonction de la température négligeable. On prendra les valeurs correspondantes au fonctionnement sous charge nominale, après stabilisation de la température des enroulements.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer. Cela revient à considérer la variation sinusoïdale des inductances mutuelle entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.
  - La symétrie de la machine.

Dans ce concept les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé s'écrivent :

### 1.1 Les équations électriques :

Les équations de la tension statoriques et rotoriques sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sa}(t) = R_s \cdot i_{sa}(t) + \frac{d\psi_{sa}(t)}{dt} \\ V_{sb}(t) = R_s \cdot i_{sb}(t) + \frac{d\psi_{sb}(t)}{dt} \\ V_{sc}(t) = R_s \cdot i_{sc}(t) + \frac{d\psi_{sc}(t)}{dt} \end{array} \right. \text{ Et } \left\{ \begin{array}{l} V_{ra}(t) = R_r \cdot i_{ra}(t) + \frac{d\psi_{ra}(t)}{dt} \\ V_{rb}(t) = R_r \cdot i_{rb}(t) + \frac{d\psi_{rb}(t)}{dt} \\ V_{rc}(t) = R_r \cdot i_{rc}(t) + \frac{d\psi_{rc}(t)}{dt} \end{array} \right. \quad (A.1)$$

Avec  $R_s$  et  $R_r$  respectivement sont les résistances statoriques et rotoriques par phase.

### 1.2 Les équations magnétiques :

Les équations du flux statoriques et rotoriques (équations magnétiques) peut être exprimé sous forme matricielle comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} [\psi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\psi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{array} \right. \quad (A.2)$$

$I_s I_r$  : Inductances propres statorique et rotorique.

$M_s M_r$  : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotorique.

$M_{sr}$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$$\text{Avec } L_s = l_s - M_s, \quad L_r = l_r - M_r, \quad M = \frac{3}{2} M_{sr} \quad (\text{A.3})$$

$$\text{Avec : } [L_s] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

### 1.3 Les équations mécaniques :

$C_{em}$  le couple électromagnétique développé par la machine,  $C_r$  le couple résistant de la charge,  $J$  l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la machine et  $f_v$  le coefficient total de frottement visqueux. Par application du principe fondamental de la dynamique, on obtient l'équation mécanique du modèle en trois phases :

$$C_{em} = C_r + f_v \cdot \omega + J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{A.5})$$

### 1.4 Modèle biphasé :

L'écriture du modèle de la machine asynchrone dans un repère diphasé tournant est obtenue en utilisant les transformations normées de Park et Concordia permettant la conservation de la puissance.

La matrice  $P(\theta)$  de Park est donnée sous la forme suivante :

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

La matrice de Concordia (matrice de transformation directe) est donnée par :

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (A.7)$$

Cependant les transformations proposées établissent les relations entre les flux d'axes diphasé et les flux d'axes triphasé :

$$[\psi_{sdq0}] = [P(\theta_s)][\psi_{sabc}] \text{ et } [\psi_{rdq0}] = [P(\theta_r)][\psi_{rabc}] \quad (A.8)$$

En appliquant ces transformations aux tensions ainsi qu'aux flux statoriques et rotoriques, nous obtenons le modèle électrique diphasé d'une machine asynchrone :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \cdot \psi_{ds} - \dot{\theta}_s \cdot \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \cdot \psi_{qs} - \dot{\theta}_s \cdot \psi_{ds} \\ V_{dr} = 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \cdot \psi_{dr} - \dot{\theta}_r \cdot \psi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \cdot \psi_{qr} - \dot{\theta}_r \cdot \psi_{dr} \end{cases} \quad (A.9)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (A.10)$$

Avec :  $\theta_s$   $\theta_r$  : Angles du champ tournant et de la position du rotor par rapport au stator.

L'équation mécanique est donnée par :

$$C_{em} = C_r + f_v \cdot \omega + J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (A.11)$$

Le couple électromagnétique s'exprime en fonction des inductances cycliques, des flux et du nombre de paire de pôles p de la machine par la relation :

$$C_{em} = \frac{p \cdot M}{L_s \cdot L_r - M^2} (\psi_{dr} \cdot \psi_{qs} - \psi_{qr} \cdot \psi_{ds}) \quad (A.12)$$

## 2. ANNEXE 2:

Considérons tout d'abord un modèle triphasé classique de machine à aimants permanents montés en surface et à rotor lisse. La matrice  $[L_s]$  des inductances propres et mutuelles des bobinages statoriques est donc une matrice qui ne dépend pas de la position du rotor. On considère que l'entrefer est constant et on négligera les effets de saturation magnétique. La **figure A.1** illustre la structure de machine synchrones en triphasé.

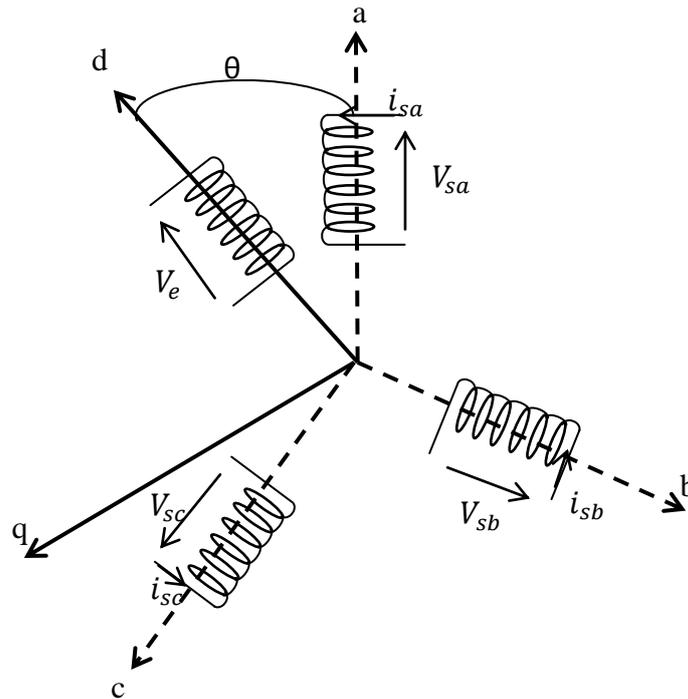


Figure A.1 la structure de machine synchrones en repère triphasé

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

Avec :

$$[\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

$$\frac{d}{dt} [\phi_s] = \frac{d}{dt} [[L_s][I_s] + [\phi_r]] = \frac{d}{dt} [L_s][I_s] + \omega \cdot \frac{d}{d\theta_e} \cdot [\phi_r] \quad (\text{A.15})$$

$$[V_s] = [R_s][I_s] + [L_s] \frac{d}{dt} [I_s] + \omega \frac{d[\phi_r]}{d\theta_e} \quad (\text{A.16})$$

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.

Pour simplifier le système d'équations à coefficients variables, un modèle dans le repère de Park de cette machine (**figure A.3**) sera utilisé  $V_{sd} \ V_{sq} \ I_{sd} \ I_{sq}$ . Le repère de Park est en fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé, plus simple à manipuler car les grandeurs électriques évoluent comme des grandeurs continues. On peut passer de l'un à l'autre repère à l'aide des équations (A.6) et (A.7).

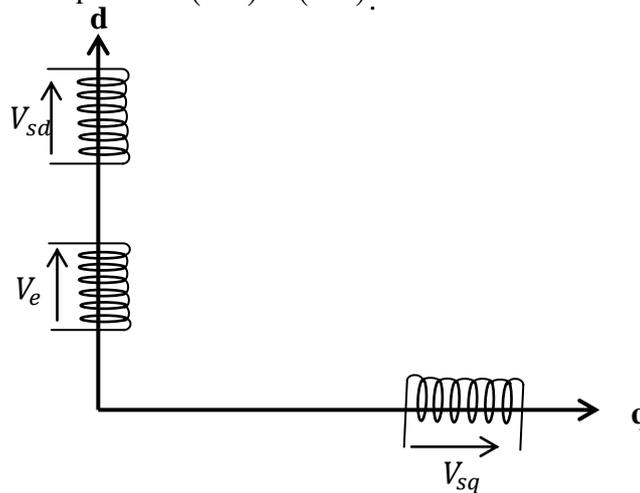


Figure A.3 la structure de machine synchrone en repère diphasé

$$[V_{sdq}] = [P(\theta)][V_{sabc}] \quad (\text{A.17})$$

$$[I_{sdq}] = [P(\theta)][I_{sabc}] \quad (\text{A.18})$$

Après développement des équations ci-dessus, on obtient les équations suivantes :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d}{dt} \cdot \phi_{ds} - p \cdot \Omega \cdot \phi_{sq} \quad (\text{A.19})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \cdot \phi_{qs} - p \cdot \Omega \cdot \phi_{sd} \quad (\text{A.20})$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs  $\phi_{sd}$  et  $\phi_{sq}$  sont fonctions linéaires des courants  $I_{sd}$  et  $I_{sq}$

$$\phi_{sd} = L_{sd} \cdot I_{sd} + \phi_e \quad (A.21)$$

$$\phi_{sq} = L_{sq} \cdot I_{sq} \quad (A.22)$$

Ou  $\phi_e$  représente le flux des aimants à travers le circuit équivalent direct.

Les équations de la machine dans le repère de Park sont les suivantes :

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} - L_s \cdot p \cdot \Omega \cdot i_{sq} \quad (A.23)$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_s \cdot \frac{di_{sq}}{dt} - L_s \cdot p \cdot \Omega \cdot i_{sd} + \phi_e \cdot p \cdot \Omega \quad (A.24)$$

Avec:

$I_{sd}$   $I_{sq}$  : Courants statoriques dans le repère de Park [A].

$V_{sd}$   $V_{sq}$  : Tensions statoriques dans le repère de Park [A].

$R_s$  : Résistance statorique [ $\Omega$ ].  $L_s$  : Inductance cyclique statorique [ $H$ ].

$P$ : Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.  $\omega$ : Pulsation des tensions [ $rad/s$ ].

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

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_{sd} - R_s \cdot i_{sd} + L_s \cdot p \cdot \Omega \cdot i_{sq}) \quad (A.25)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_{sq} - R_s \cdot i_{sq} - L_s \cdot p \cdot \Omega \cdot i_{sd} - \phi_e \cdot p \cdot \Omega) \quad (A.26)$$

On les exprimant sous forme matricielle, on a :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} = \frac{1}{L_s} \left[ \begin{pmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s & -L_s \cdot p \cdot \Omega \\ L_s \cdot p \cdot \Omega & R_s \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ \phi_e \cdot p \cdot \Omega \end{pmatrix} \right] \quad (A.27)$$

Le couple électromécanique développé par les machines synchrones à f.e.m sinusoïdale peut être donné par la relation suivante

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [\phi_{sd} \cdot I_{sq} - \phi_{sq} \cdot I_{sd}] \quad (A.28)$$

Après affectation des opérations nécessaires on peut écrire :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} \cdot I_{sq} + \phi_e \cdot I_{sq}] \quad (A.29)$$

Avec

$$L_{sd} = L_{sq} = L_s \quad (A.30)$$

Le couple électromagnétique sera :

$$C_e = \frac{3}{2} P \cdot \phi_e \cdot I_{sq} \quad (A.31)$$

### 3. ANNEXE 3:

#### 3.1 Grandeurs nominales :

|                                     |                   |
|-------------------------------------|-------------------|
| <i>Tension nominale du système</i>  | <b>220V-380V</b>  |
| <i>Fréquence nominale</i>           | <b>50Hz</b>       |
| <i>Puissance nominale du MAS</i>    | <b>250KVA</b>     |
| <i>Puissance nominale du MS</i>     | <b>300KVA</b>     |
| <i>Courant nominale pour la MAS</i> | <b>378A</b>       |
| <i>Courant nominale pour la MS</i>  | <b>454A</b>       |
| <i>Banc de capacité</i>             | <b>C=0,00264F</b> |

#### 3.2 Paramètres de la machine asynchrone : les grandeurs sont en PU

|   |              |
|---|--------------|
| <i>Résistance statorique (<math>R_s</math>)</i>         | <b>0.016</b> |
| <i>Résistance rotorique (<math>R_r</math>)</i>          | <b>0.016</b> |
| <i>Inductance cyclique au stator (<math>L_s</math>)</i> | <b>0.06</b>  |
| <i>Inductance cyclique au rotor (<math>L_r</math>)</i>  | <b>0.06</b>  |
| <i>Inductance mutuelle (<math>L_m</math>)</i>           | <b>3.5</b>   |
| <i>Pair de pôles</i>                                    | <b>2</b>     |

#### 3.3 Paramètres de la machine synchrone : les grandeurs sont en PU

|                                 |                           |
|---------------------------------|---------------------------|
| Résistance statorique ( $R_s$ ) | <b>0.0036</b>             |
| Réactance $X_d, X'_d, X''_d$    | <b>1.56, 0.296, 0.177</b> |
| Réactance $X_q, X'_q$           | <b>1.06, 0.177</b>        |
| Réactance $X_l$                 | <b>0.052</b>              |
| Pair de pôles                   | <b>2</b>                  |

