

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Présenté par :

Kairouani Riad

Dari Med El-hadi

Thème:

intégration d'une éolienne sur un réseau électrique isolé

Soutenu publiquement

Le : 09/06/2014

Devant le jury :

M^f. Bourek Yacine

M^f. Guehrar Youcef

M^{me}. Benbouza Naima

M^f. Boudjella Houari

MC (A)

MA (A)

MA (A)

MA (B)

Président

Encadreur/rapporteur

Examineur

Examineur

UKM Ouargla

UKM Ouargla

UKM Ouargla

UKM Ouargla

Année universitaire 2013/2014

REMERCIEMENT

Avant tous, Nous remercions en premier lieu notre dieu de nous donner la santé et la patience pour avoir terminé ce travail.

Je remercie très vivement monsieur Guehrar Youcef Maître de conférences à l'Université Kasdi Merbah Ouargla de m'avoir confié le sujet, et de l'aide précieuse qu'il a toujours bien voulu m'apporter. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

J'adresse mes chaleureux remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et ce mémoire

M. Bourek Yacine, Mme. Benbouza naima, M. Boudjella haouari

Mes vifs remerciements vont également à l'ensemble des enseignants de l'institut d'électrotechnique de l'université de Ouargla pour la formation qu'ils nous ont assuré au long de notre cursus universitaire.

Mes vifs remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, en particulier.

Je tiens à remercier mes parents car ce travail représente un petit fruit de leur souffrance et qui sans eux je ne pouvais traverser ces longues années d'études et de travail.

Je ne saurais terminer sans remercier Ma très chère mère et mon très cher père mes frères et ma sœur ainsi que toute la famille pour leurs

Encouragements soutenus et surtout pour leur soutien moral.

KAIROUANI-Riad

DARI Med EL-Hadi

SOMMAIRE

SOMMAIRE	I
LISTE DES TABLEAUX	VI
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES SYMBOLES	X
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	XIV

Chapitre I: Système autonome et système hybride

I.1.Introduction.....	2
I.2.Système autonome.....	2
I.3.Systèmes hybrides	3
I.3.1.Définition et mission des SEH.....	3
I.3.2.Etat de l'art.....	4
I.3.2.1.Principaux composants des SEH	6
I.3.2.1.1.Sources d'énergie renouvelable.....	7
I.3.2.1.2.Générateur diesel	7
I.3.2.1.3.Systèmes de stockage	8

I.3.2.1.4.Système de supervision	8
I.3.2.1.5.Convertisseurs	9
I.3.2.1.6.Charges	10
I.3.2.2.Configuration de bus dans système énergie hybride.....	10
I.3.2.2.1.Architecture à bus à CC.....	10
I.3.2.2.2.Architecture mixte à bus à CC/CA	11
I.3.2.2.3.Configuration de bus CA.....	13
I.3.3.Stratégie de fonctionnement	14
I.3.4. Problèmes d'intégration des énergies renouvelables sur un réseau.....	14
I.4.Conclusions	17
Chapitre II : Généralités sur Les éoliennes	
II.1.Introduction.....	19
II.2.Historique.....	19
II.3.Définition.....	19
II.4.Les différents types d'éoliennes.....	20
II.4.1.Les éoliennes à axe vertical.....	20

II.4.2.Les éoliennes à axe horizontal.....	21
II.5.principaux composants d'une éolienne à axe horizontal	22
II.6.Applications des éoliennes.....	23
II.7.Potentiel énergétique.....	24
II.7.1.Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique.....	24
II.7.2.Le coefficient de puissance.....	24
II.7.3.Le coefficient de vitesse réduite.....	25
II.7.4.Limite de Betz.....	25
II.7.5.Clasement des types d'éolienne en fonction du coefficient de puissance..	26
II.8.générateur	27
II.8.1.Générateur Asynchrone (GAS)	27
II.8.1.1.Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE)	27
II.8.1.2.Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné (GARB)	28
II.8.1.3.Génératrice Asynchrone à double Alimentation (GADA)	28
II.8.2.Générateur Synchrone (GS)	29
II.8.2.1.Générateur Synchrone à Rotor Bobiné (GSRB)	29

II.8.2.2.Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)	30
II.8.3.Autres Générateurs	30
II.9.Le Machine Asynchrone à Double Alimentation	31
II.9.1.Principe de fonctionnement.....	31
II.9.2.Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	32
II.9.3.Mode de fonctionnement de la machine à vitesse variable.....	33
II.10.Conclusion.....	35

Chapitre III: Dimensionnement et Simulation

III.1.Introduction	37
III.2.Méthodologie adoptée	37
III.2.1.Description du profil de consommation d'énergie électrique du site ...	37
III.2.2.Description du profil de vent du site	38
III.3.Dimensionnement des sources	39
III.3.1.choix d'éolienne	39
III.3.2.choix de générateur diesel	40
III.4.Validation de dimensionnement du système hybride moyennant le logiciel HOMER	40
III.4.1.Description du logiciel HOMER	40

III.5.Descriptions des blocs utilisés en Matlab/Simulink	42
III.5.1.Système éolien	42
III.5.1.1.Modèle éolienne utilisant SimPowerSystem Toolbox	43
III.5.1.2. Le modèle de turbine	43
III.5.2.Générateur diesel	46
III.5.2.1.Moteur diesel et régulateur de vitesse	46
III.5.2.2.Modèle simplifié de la machine synchrone	48
III.6.Interprétation des résultats	50
III.6.1.Analyse du comportement dynamique du SEH	50
III.6.1.1.Variation climatique (vent).....	50
III.6.1.2.Variation de la charge	54
III.6.1.3. Démarrage d'éolien	56
III.7 Conclusions	59
CONCLUSION GENERALE.....	XVI
BIBLIOGRAPHIE	60
ANNEXE	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Classification des SEH par gamme de puissance	5
Tableau I-2 : Classification des systèmes éolien-diesel basée Sur le taux de pénétration de l'énergie éolienne	6
Tableau III-1 : la consommation de la charge chaque heure	38
Tableau III-2 : variations mensuelles de la vitesse moyenne à 10 m sites au Nord du Sahara	39
Tableau III-3 : Energie annuelle produite	42
Tableau III-4 : Energie annuelle consommée	42

LISTES DES FIGURES

Figure I-1 : Architecture des SEH	4
Figure I-2 : Configuration du générateur diesel	8
Figure I-3 : Système de supervision	9
Figure I-4 : Configuration du SEH à bus CC	11
Figure I-5 : Configuration du SEH à deux bus CC et à CA	12
Figure I-6 : Courbe du rendement d'un moteur diesel	15
Figure II.1 : Eolienne à axe vertical	21
Figure II.2 Eolienne à axe horizontal	22
Figure II.3 Principales composants de l'éolienne à axe horizontal	23
Fig. II-4 : vitesse du vent et vitesse tangentielle en bout de pales	25
Fig. II-5 : Coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types de turbines	26
Figure II.6. Système de conversion éolien avec GACE à vitesse fixe	28
Figure II.7. Système avec GADA pour l'opération à vitesse variable	28
Figure II.8. Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable	29
Figure II-9 : Structure de la GADA à rotor bobiné	32
Figure II-10 : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	33

Figure II-11 : Bilans simplifiés des transferts d'énergie dans une machine à double alimentation lorsque la vitesse varie de la moitié au double de Ω .	35
Figure III-1: Carte saisonnière des vents à 10m du sol (m/s)	38
Figure III-2: Profil du vent	41
Figure III-3 : Profil de charge	41
Figure II-4 : Architecture du SEH	41
Figure III- 5: Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source	42
Figure III-6 : structure du système éolien	43
Figure III.7: Block de l'éolienne sous SimPowerSystem	43
Figure III.8 : Paramétrage d'une turbine éolienne utilisant le modèle sous SimPowerSystem.	44
Figure III.9: Paramètres de la turbine éolienne sous SimPowerSystem	44
Figure III-10. Caractéristiques de turbine et caractéristique de Cheminement	45
Figure III.11: Paramètres du convertisseur turbine éolienne sous SimPowerSystem	45
Figure III.12: Paramètres du le système contrôle de turbine éolienne sous SimPowerSystem	46

Figure III-13 : Bloc d'un moteur diesel simplifié et du régulateur de vitesse	47
Figure III-14 : Bloc d'un actionneur	47
Figure III-15 : Modèle équivalent d'un enroulement	48
Figure III-16 : Bloc de simulation de système hybride	50
Figure III-17 : La puissance active	51
Figure III-18 : La puissance réactive	52
Figure III-19 : La vitesse de rotation du GD	52
Figure III-20 : Les tensions	53
Figure III-21 : La puissance active	54
Figure III-22 : La puissance réactive	55
Figure III-23 : La vitesse de rotation du GD	55
Figure III-24 : Les tensions	56
Figure III-25 : la puissance active	56
Figure III-26 : La puissance réactive	57
Figure III-27 : La vitesse de rotation du GD	58
Figure III-28 : Les tensions	59

Symbole

I_{ins}	la pénétration instantanée.
P_{rw}	la puissance éolienne
P_{ch}	la puissance électrique de la charge
I_{moy}	la pénétration moyenne (mesurée pendant des jours, des mois ou même des années).
W_{rw}	l'énergie éolienne
W_{ch}	l'énergie consommée par la charge principale.
E_c	l'énergie cinétique
v	la vitesse
m	une masse d'air
S	une surface
ρ	la masse volumique de l'air
P_v	la puissance incidente
P_m	la puissance du vent
λ	la vitesse réduite
R	le rayon de la voilure
Ω	la vitesse de rotation
C_p	coefficient de puissance

C_c	le coefficient de couple
g	glissement
$f.e.m$	force électromotrice
E_r	force électromotrice rotorique
E_s	force électromotrice statorique
N_r	nombre de spires des bobinages rotoriques
N_s	nombre de spires des bobinages statoriques
ω_{mec}	vitesse mécanique
ω_s	vitesse synchronisme
I_r	courant rotorique
I_s	courant statorique
S_r	puissance apparente rotorique
S_s	puissance apparente statorique
K	coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)
N	nombre de conducteurs d'une phase de la machine
Φ	flux maximum à travers un enroulement [Wb]
n_s	vitesse de rotation [rpm]
K'	constante globale (caractéristique de la machine)
e_g	force électromotrice à vide
V	tension
R_g	résistance de l'enroulement

L_g	inductance synchrone
J_{ds}	l'inertie totale de l'ensemble moteur diesel générateur Synchrone
Ω_s	la vitesse de rotation;
T_d	le couple mécanique sur l'arbre ;
T_{em_g}	le couple électromagnétique.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

SEH	Système d'Energie Hybride
GD	Générateurs diesel ou groupe diesel
CC	Courant continu
CA	Courant alternatif
GAS	Générateur Asynchrone
GACE	eng : (SCIG) Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil
GARB	Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné
GADA	eng : (WRIG) Génératrice Asynchrone à double Alimentation
GS	Générateur Synchrone
GSRB	Générateur Synchrone à Rotor Bobiné
GSAP	eng : (PMSG) Générateur Synchrone à Aimants Permanents
GFT	Générateur à flux transversal
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
MADA	Machine asynchrone à double alimentation

Introduction générale

a. Généralité

Le développement des énergies renouvelables est en pleine expansion. On peut notamment citer la production d'énergie par systèmes éoliens et par systèmes photovoltaïques. Cependant, dans ce type de systèmes à énergie renouvelable, la source primaire de production d'énergie induit de grandes variations de puissance en raison des fluctuations de vent et d'ensoleillement. Dans le cas de l'énergie éolienne, le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Les variations de la puissance résultant des fluctuations du vent, constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne.

Le taux de pénétration des générateurs éoliens dans les réseaux électriques représente le ratio de la production éolienne et de la demande du réseau fiable [1]. Plus le taux de pénétration est élevé, plus grand est l'impact potentiel des générateurs éoliens sur la stabilité du réseau électrique auquel ils sont connectés [1]. Les volumes et périodes de production éolienne ne correspondent pas aux volumes et périodes de consommation électrique. Pour disposer d'électricité au moment que l'on désire, on a recours à un système qui combine l'éolienne et une source d'énergie avec une production garantie. Les systèmes éoliens peuvent ainsi être équipés d'un dispositif de stockage d'énergie (volant d'inertie, batterie, etc.), qui fournit, pour un temps limité, de l'électricité de remplacement quand le vent n'est pas propice, et d'une source de production au diesel (groupe électrogène) pour la génération d'électricité à long terme. De nos jours, dans les réseaux concernés par la présente, le groupe électrogène diesel est la source principale de production d'électricité.

Dans l'application en groupe électrogène, la capacité de bon fonctionnement en puissance variable est essentielle pour garder la stabilité du réseau lorsque varient les besoins des clients qui y sont raccordés. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, des systèmes de stockage et des systèmes de génération intermédiaires, de nouvelles méthodes de gestion multi sources et algorithmes de contrôle sont apparus pour optimiser cette génération d'énergie [2].

Dans le cas d'un usage en site isolé, pour des applications nordiques par exemple [3], dont l'alimentation est généralement assurée par des groupes électrogènes diesels. Seulement, le carburant est généralement plus cher car il faut prévoir des coûts de transport additionnels vers ces endroits isolés, parfois difficilement accessibles. C'est pourquoi

L'utilisation des groupes électrogènes diesels combinés à une source d'énergie renouvelable et un système de stockage, formant ainsi un système hybride, est appelée à jouer un rôle essentiel, et permet de réduire la consommation de carburant par les groupes électrogènes diesels et éventuellement réduire les coûts d'opération. Les variations de la puissance produite par l'éolienne peuvent être absorbées par le groupe électrogène, ou par les systèmes de stockage [2].

Ce travail met en évidence la nécessité d'élaborer des stratégies de gestion de l'énergie dans les différents éléments de la chaîne de conversion éolienne et leurs apports dans l'amélioration de la qualité d'onde à transmettre à la charge (réseau).

b. Objectif

L'intégration d'une éolienne sur un réseau isolé est d'aider le groupe diesel pour fournir de l'énergie au réseau isolé et ainsi de réduire la consommation de carburant par le groupe diesel. Ce travail met en évidence le comportement d'un système hybride qui comporte un groupe diesel et une génératrice éolienne.

c. Structure du mémoire

Notre mémoire comprend trois chapitres :

Le chapitre 1 est consacré pour l'étude bibliographique des systèmes hybrides, leurs architectures, leurs composants et les problèmes de l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau.

Des généralités sur les éoliennes sera l'objectif de **2^{ème} chapitre**, nous parlerons sur leur historique, leur évolution et les types des turbines et les types des générateurs.

Dans **le 3^{ème} chapitre**, un dimensionnement du système sera effectué avec une simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus illustrent l'efficacité et la stabilité du système.

SYSTÈME AUTONOME ET SYSTÈME HYBRIDE

- système autonome
- système hybride

I-1. INTRODUCTION :

Dans la plupart des régions isolées, le générateur diesel est la source principale d'énergie électrique. Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique est prohibitif et le prix du combustible augmente radicalement avec l'isolement. La baisse continue des prix des générateurs basés sur l'énergie renouvelable et la fiabilité croissante de ces systèmes ont mené à une plus grande utilisation des sources d'énergie renouvelable pour la génération d'énergie électrique dans les régions isolées.

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est liée à la variabilité des ressources. Les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec les ressources. Pour les régions isolées, la solution à retenir est certainement le couplage entre plusieurs sources, par exemple des éoliennes, des panneaux photovoltaïque et des générateurs diesel.

Après avoir présenté la définition et la mission d'un SEH, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'état de l'art, en particulier relatif aux sources d'énergie qui composent ces systèmes habituellement. Nous décrivons les différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les ressources renouvelables en site isolé, ainsi que les moyens de dimensionnement du SEH. Quelques problèmes de fonctionnement du SEH sont présentés à la fin de ce chapitre.

I-2. SYSTEME AUTONOME :

Pour les réseaux de petites puissances en site isolé, le groupe électrogène est l'unique source d'énergie utilisée. Une solution couramment employée consiste à associer les groupes électrogènes, souvent diesel à des sources d'énergie supplémentaire, aérogénérateur par exemple. Pour éviter les démarrages trop fréquents du groupe électrogène, ou pour assurer les transitions, des batteries électrochimiques, voire des accumulateurs inertiels, peuvent également être associées via un convertisseur électronique [4]. Les éléments constituant le système sont de plus en plus reliés entre eux par l'intermédiaire d'un bus continu, en particulier dans le cas des systèmes à vitesse variable.

Le système à bus continu peut être utilisé directement ou par l'intermédiaire d'un convertisseur CC-CC pour le chargement des batteries, mais ne convient pas aux charges qui nécessitent du courant alternatif. Dans ce cas, on a besoin d'un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif. Les onduleurs deviennent plus courants dans les installations sans branchement direct de la génératrice de l'éolienne au réseau. Ils permettent de concevoir de nouvelles stratégies de commande et de supervision et peuvent fournir une

tension alternative compatible avec les normes de connexion au réseau (amplitude, fréquence et contenu harmonique) [5].

I-3. SYSTEMES HYBRIDES :

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées mais la présence du générateur diesel dans ce type de système hybride autonome suscite certaines discussions quant aux notions de « propreté » et de durabilité [6].

I-3.1. Définition et mission des SEH :

Les systèmes d'énergie hybrides (SEH) 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 [1-4]. Les sources d'énergie 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'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Le but d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie [7]. De plus, l'économie de carburant et la baisse de prix obtenues par la génération hybride doivent au moins couvrir l'investissement fait pour les générateurs d'énergie renouvelable et les autres composants auxiliaires du système.

Du point de vue technologique, la fiabilité n'est pas seulement une question de respect des normes pour l'alimentation en électricité, mais aussi de maintenance, compte tenu des conditions particulières des régions isolées. Les systèmes isolés sont souvent caractérisés par une infrastructure (communication, services, etc.) pauvre, un accès difficile et un manque de personnel qualifié.

Les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie, sont influencées en partie par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture etc. et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques

paramètres permettant d'évaluer ses performances sont : l'économie de carburant, le coût du kW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien etc.

La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en connexion aux réseaux interconnectés) [7]. Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes et la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.

I-3.2. ETAT DE L'ART :

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesels (GD) et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SEH peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Celles-ci sont résumées dans la Figure I-1. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [7] : les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. A part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique.

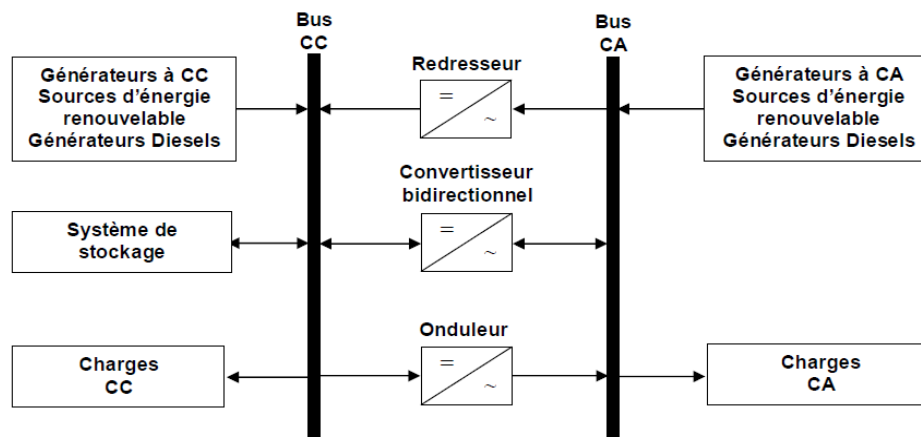


Figure I-1 : Architecture des SEH

La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts pour des applications domestiques jusqu'à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petites îles [7].

Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (Tableau I-1). Les seuils de puissance donnés ne sont que des ordres de grandeurs.

Tableau I-1 : Classification des SEH par gamme de puissance

PUISSANCE DU SEH [KW]	APPLICATION
Faible: < 5	Systèmes autonomes: stations de télécommunications, de pompage de l'eau, autres applications isolées
Moyenne: 10 -250	Micro réseaux isolés: alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales...
Grande: > 500	Grands réseaux isolés (ex: réseaux insulaires)

Les grands SEH en site isolé peuvent être classifiés en fonction du degré de pénétration de l'énergie éolienne [7]. Les expressions qui permettent de calculer l'indice de pénétration sont:

$$I_{ins} = P_{rw} [KW] / P_{ch} [KW] \dots\dots\dots (I-1)$$

et

$$I_{moy} = W_{rw} [KWh] / W_{ch} [KWh] \dots\dots\dots (I.2)$$

Où :

I_{ins} : la pénétration instantanée.

P_{rw} : la puissance éolienne

P_{ch} : la puissance électrique de la charge

I_{moy} : la pénétration moyenne (mesurée pendant des jours, des mois ou même des années).

W_{rw} : l'énergie éolienne

W_{ch} : l'énergie consommée par la charge principale.

Une classification des grands systèmes éolien-diesel sur trois niveaux a été proposée [7]. Cette classification sépare les systèmes en fonction du taux de pénétration de l'énergie éolienne et donne leurs caractéristiques de fonctionnement (Tableau I-2).

Tableau I-2 : Classification des systèmes éolien-diesel basée sur le taux de pénétration de l'énergie éolienne

NIVEAU DE PENERATION	CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT	PENETRATION	
		PIC INSTANTANE	MOYENNE ANNUELLE
FAIBLE	<ul style="list-style-type: none"> - GD fonction sans arrêt - La production renouvelable réduit la charge du diesel - l'énergie éolienne alimente la charge principale - il n'y a pas de système de supervision 	< 50%	< 20%
MOYEN	<ul style="list-style-type: none"> - GD fonctionne sans arrêt - commande relativement simple 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%
ELEVE	<ul style="list-style-type: none"> - GD peut être arrêté en fonction de la production d'énergie éolienne - Système auxiliaires pour contrôler la tension et la fréquence commande complexe. 	100% - 400%	50% - 150%

I-3.2.1. Principaux Composants des systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride sont en général constitués de sources d'énergie classique (groupe électrogène), de source d'énergie renouvelable (éolienne). Ils peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie (hydroélectrique, marémotrice, géothermique etc.), des convertisseurs statiques et dynamiques, des systèmes de stockage (batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène.....), des charge principales et de délestages et un système de surveillance.

I-3.2.1.1. Sources d'énergie renouvelable :

Une énergie renouvelable est une énergie exploitable par l'Homme, de telle manière que ses réserves ne s'épuisent pas. En d'autres termes, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation.

Le Soleil est à l'origine de nombreuses énergies renouvelables. Son rayonnement constitue en lui-même une énergie exploitable. Ce rayonnement donne aussi naissance à d'autres formes d'énergie, ainsi le cycle de l'eau permet de créer de l'hydroélectricité, le vent est aussi exploité.

La photosynthèse a aussi comme origine le soleil, elle crée différents matériaux exploitables énergétiquement, mais pas toujours renouvelables.

La chaleur interne de la Terre est source d'énergie considérée comme renouvelable, la géothermie. La rotation des astres, système Terre-Lune, engendre des mouvements d'eau à la surface de la Terre, mouvements exploitables énergétiquement via l'énergie marémotrice.

Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le pétrole ainsi que tous les combustibles fossiles ne sont pas des énergies renouvelables, les ressources étant consommées à une vitesse bien supérieure à la vitesse à laquelle ces ressources sont naturellement créées [8].

I-3.2.1.2. Générateur diesel :

Dans le cas des installations à d'énergie renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (figure I-2). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse (régulateur de vitesse) sur le moteur diesel [6]. Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel. Pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

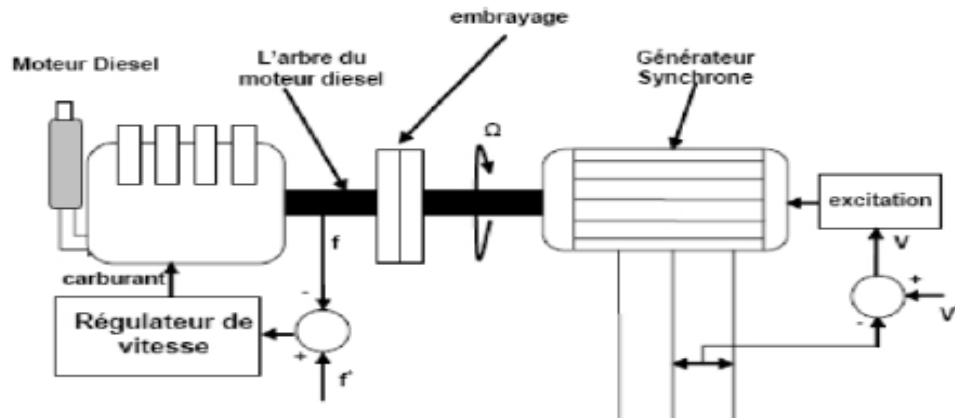


Figure I-2 : Configuration du générateur diesel [6]

Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive.

Quand plusieurs générateurs diesel fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus à CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels.

I-3.2.1.3. Systèmes de stockage :

Le stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie hybride en site isolé. Dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont d'habitude du type plomb-acide. Les batteries nickel-cadmium sont rarement utilisées. La technologie des batteries plomb-acide bénéficie en effet d'avantages, tels son faible coût (par rapport à d'autres technologies) et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce.

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connecté à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [6].

I-3.2.1.4. Système de supervision :

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Les chargeurs des batteries, par exemple, incluent souvent un système de commande pour empêcher la surcharge des batteries ou que leur état de charge baisse trop. Les réseaux multi –

diesel peuvent utiliser des méthodes relativement sophistiquées pour gérer les générateurs diesels et régler le flux de puissance.

Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système. Quelques exemples de commandes intégrées sont le gouverneur de vitesse sur le moteur diesel, le régulateur de tension sur le générateur synchrone du diesel ou la commande de l'éolienne.

Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants (Figure I-3). Ce système de surveillance est d'habitude automatique. Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.

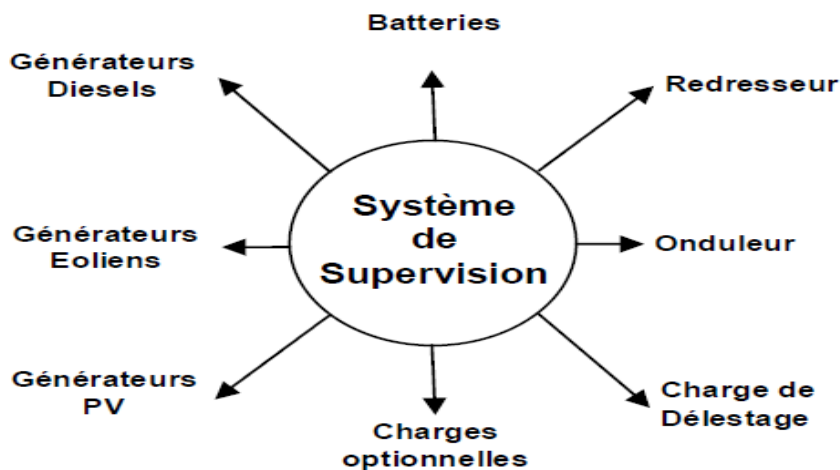


Figure I-3 : Système de supervision

I-3.2.1.5. Convertisseurs :

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement.

Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome

exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources.

I-3.2.1.6. Les charges :

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des 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 courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

I-3.2.2. Configuration de bus dans les systèmes hybrides :

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Ces configurations constituées par des sources d'énergies éoliennes, des batteries et des générateurs diesels se résument en trois types :

Architecture à bus CC (bus à courant continu) et architecture à bus CC-CA (la connexion mixte, bus à CA et bus à CC), architecture à bus CA (bus à courant alternatif) [6]. Nous présenterons ci-après, une description ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque configuration.

I-3.2.2.1. Architecture à bus à CC :

Dans le système hybride présenté dans la figure (I- 4), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC.

Le ou les générateur(s) diesel(s) sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges à CA. Les générateurs diesels ne peuvent donc pas alimenter les charges à CA directement.

L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence [6]. Les batteries et l'onduleur sont

dimensionnés pour alimenter des pics de charge, alors que le générateur diesel est dimensionné pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps.

La puissance délivrée peut être contrôlée par la commande du courant d'excitation de la partie électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie éolienne. Les avantages et les désavantages d'un tel système sont présentés ci-après.

Avantage :

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

Inconvénients :

- le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

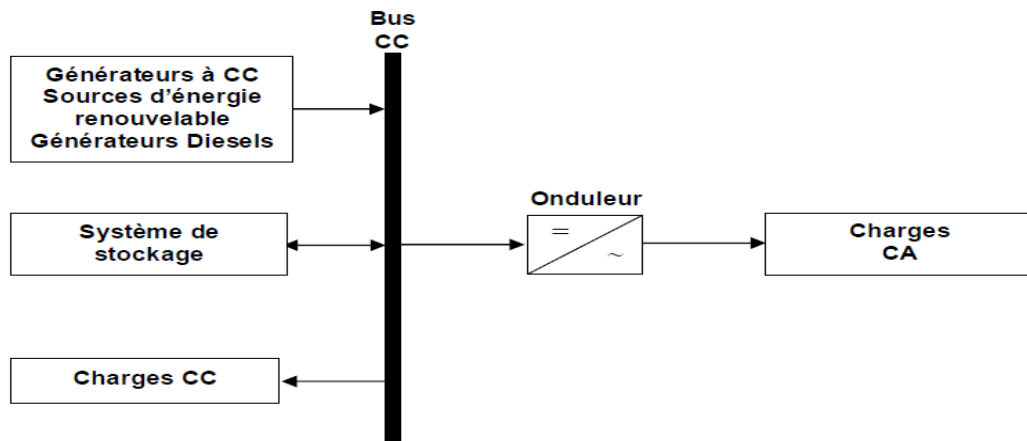


Figure I-4 : Configuration du SEH à bus CC

I-3.2.2.2. Architecture mixte à bus à CC/CA :

La configuration à deux bus à CC et à CA est présentée dans la figure (I-5). Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure (un couplage CC).

Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter

le rendement du système et de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur. Le ou les générateur(s) diesel(s) et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie.

Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur) [6].

Quand il y a un surplus d'énergie de la part du générateur diesel, il peut aussi charger les batteries (fonctionner en redresseur).

L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est surchargé.

Pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage est très répandue [6].

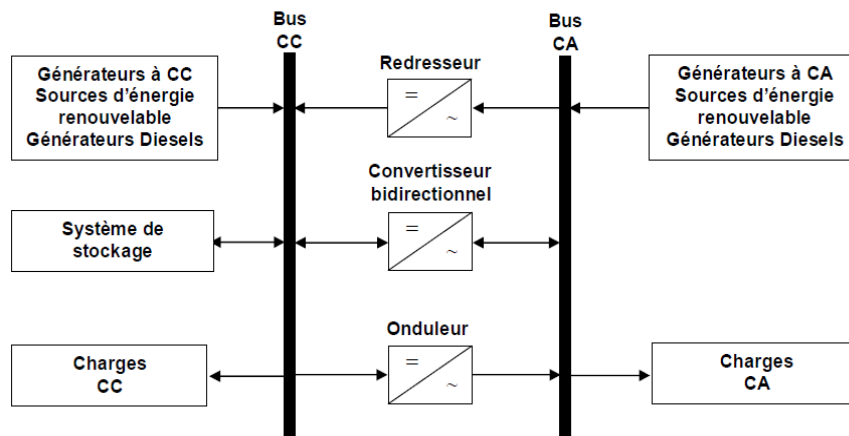


Figure I-5 : Configuration du SEH à deux bus CC et à CA

Avantage:

- le GD et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- La possibilité de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

Inconvénients :

- La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions en sortie du GD).

I-3.2.2.3. Configuration de bus CA :

Des nouvelles approches sont proposées pour améliorer la modularité par un couplage CA (toute l'énergie converge vers un même bus CA) [6]. Toutes les sources de productions sont reliées au bus CA via des convertisseurs sauf le générateur diesel qui peut fixer la fréquence de bus.

L'aspect pratique de la configuration de bus exclusivement CA.

Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA (voir figure I-5) permet désormais de réaliser des systèmes flexibles constitués de composants modulaires. En fonction de l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelable que conventionnelles.

Le système peut en outre être élargi en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants.

Ces structures peuvent être utilisées pour l'alimentation de tous les consommateurs électriques, y compris dans les régions des pays en voie de développement et des pays nouvellement industrialisés dans lesquels l'électricité, l'approvisionnement en eau et la purification de l'eau potable sont des besoins vitaux.

L'utilisation du courant alternatif présente plusieurs avantages et inconvénients :

Avantage :

- un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres.
- le générateur diesel peut fixer la tension et fréquence de bus (CA).
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif (transformateur).
- Appareillage de connexion bon marché et disponible facilement.
- Les circuits triphasés produisent un champ magnétique rotatif permettant des moteurs compacts et efficaces.
- La fréquence peut être utilisée comme moyen de contrôle (dérive de fréquence) [6].

Inconvénients :

- le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande.

I-3.3. Stratégie de fonctionnement :

La stratégie de fonctionnement est un algorithme qui permet au système de supervision d'un SEH de décider combien et quels générateurs il faut mettre en marche, quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, si disponible [7].

Le fonctionnement d'un SEH dépend des paramètres suivants :

- Le profil de charge : les variations diurnes, les variations saisonnières, les pics et les creux, etc.
- Les caractéristiques des ressources éoliennes : les valeurs moyennes, l'écart type, la fréquence des événements, les valeurs extrêmes, les variations diurnes et saisonnières, etc.
- Les caractéristiques des générateurs classiques : le type de carburant, les limites de fonctionnement, etc.
- La configuration du système : le nombre et les types de composants (les sources d'énergie éolienne, les sources classiques, les charges contrôlables, les types de stockage, les convertisseurs de puissance, etc.)
- Les normes de qualité de l'énergie : les exigences en ce qui concerne les variations de la fréquence et de la tension.

Par conséquent, certaines stratégies de fonctionnement peuvent être plus efficaces dans des applications particulières, en fonction des objectifs du système et les caractéristiques présentées ci-dessus. Une brève description de quelques stratégies de fonctionnement est donnée ci-après.

I-3.4. Problèmes d'intégration des énergies renouvelables sur un réseau :

Les systèmes d'énergie en site isolé rencontrent en général les mêmes problèmes que les réseaux faibles [7]. Ces difficultés, qui ne se présentent pas dans les grands réseaux interconnectés, sont en général causées par :

- Les variations de l'énergie d'origine renouvelable (indépendamment de la charge).

- Le manque de connaissances dans le domaine de la qualité de l'énergie en réseau faible.

Compte tenu de la nature stochastique des sources d'énergie renouvelable, la difficulté principale des SEH comportant ce type de sources est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge. Le moyen le plus simple d'éviter une augmentation du risque de ne pas satisfaire complètement la charge est de faire fonctionner les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels en parallèle, de façon continue (le générateur diesel fonctionne sans arrêt) [7]. Dans ce type de fonctionnement, les sources d'énergie renouvelable agissent comme une charge négative, en réduisant la charge moyenne des générateurs diesels. Ceux derniers peuvent fonctionner à une puissance très basse (Figure I-6), mais l'économie de carburant est modeste à cause du rendement très faible (en fonctionnement à vide, la consommation de carburant s'estime à 25-30 % de la consommation à pleine charge) [7]. Ainsi, garder un moteur diesel au régime de ralenti pour une demande de puissance nulle suppose une consommation de carburant non négligeable.

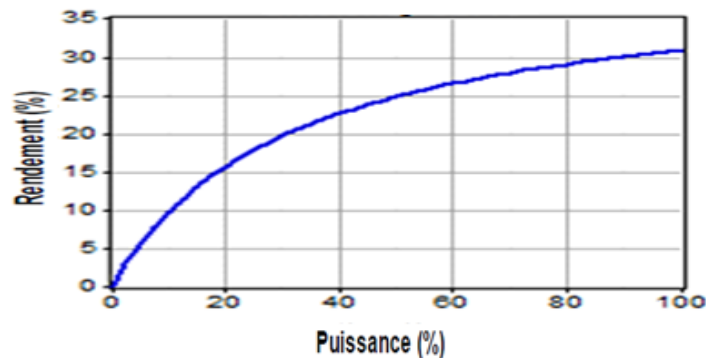


Figure I-6 : Courbe du rendement d'un moteur diesel.

Si l'énergie renouvelable est suffisante pour alimenter la plupart de la charge, la quantité de carburant économisé peut alors être augmentée en faisant fonctionner les générateurs diesels par intermittence [7]. En fonctionnement intermittent, les générateurs diesels démarrent et s'arrêtent en fonction de la variation de l'énergie renouvelable et de la charge. Le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels peut, par conséquent, être très élevé. Le problème dans ce cas est l'usure prématurée des GD et de leurs démarreurs [7]. Un autre problème devant être pris en compte quand le générateur diesel fonctionne par intermittence est le temps nécessaire pour le démarrage et l'arrêt. Le système peut, par exemple, s'effondrer subitement pendant le démarrage du générateur diesel, si l'énergie renouvelable diminue plus vite que le temps nécessaire pour la phase de démarrage.

Il arrive parfois que la production d'énergie renouvelable soit plus importante que la consommation de la charge. Si l'excès d'énergie dans le réseau ne peut pas être éliminé, la production d'énergie renouvelable doit alors être limitée ou même arrêtée. En général, les systèmes sans stockage utilisent une charge de délestage pour maintenir l'équilibre énergétique et la stabilité de la fréquence. D'autres applications nécessitent des systèmes de commande supplémentaires pour maintenir la qualité de la tension. Tous ces dispositifs, tels que les charges de délestage et les systèmes de commande, augmentent le coût d'investissement qui peut ne pas être justifié par les avantages du système hybride. Seule une stratégie de commande adéquate peut permettre d'intégrer de manière optimale différents composants et donc de rendre le système rentable.

La dynamique des générateurs d'énergie renouvelable peut aussi causer des problèmes dans le fonctionnement des SEH. Par exemple, le démarrage d'une éolienne quand la vitesse du vent est élevée. Dans ce cas, la puissance produite par l'éolienne atteint presque instantanément la puissance nominale du générateur. Ces changements rapides dans la production d'énergie peuvent générer des problèmes de qualité d'énergie (variation de tension et de fréquence) et même l'arrêt complet du système.

Les générateurs asynchrones, largement utilisés dans les éoliennes, ont besoin d'une quantité importante de puissance réactive, surtout pendant la phase d'excitation (démarrage). S'il n'y a pas assez de sources de puissance réactive dans les SEH et une ou plusieurs éoliennes démarrent, l'augmentation soudaine de la consommation de puissance réactive provoque des creux de tension et le système décroche. D'autres sources de perturbations pouvant générer des creux de tension sont les courts circuits [7]. Ceux-ci peuvent provoquer l'effondrement des SEH, mais aussi une phase de ré-excitation des générateurs asynchrones connectés au système.

Une autre perturbation qui peut poser des problèmes est la surtension. Une surtension peut être causée par un court-circuit, l'arrêt d'une charge importante ou la connexion d'un banc de condensateurs.

Un inconvénient majeur dans un SEH connecté en réseau triphasé isolé est le déséquilibre de tension entre les phases. Un récepteur électrique triphasé déséquilibré ou des récepteurs monophasés déséquilibrés alimentés par un réseau isolé triphasé peuvent conduire à des déséquilibres de tension. Ces déséquilibres provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements supplémentaires dans les machines tournantes à CA.

Du point de vue de la continuité de la production et de la qualité de l'énergie, les facteurs pouvant affecter le fonctionnement d'un SEH sont résumés ci-après :

- Les variations de la charge à long terme : les régions isolées avec des petits réseaux électriques peuvent subir des changements rapides dans leurs besoins en électricité (généralement, la demande augmente).
- Les variations de la charge à court terme : en général, la demande en électricité varie beaucoup sur des intervalles de temps assez courts, de l'ordre de quelques minutes.

Des valeurs minimales sont suivies par des pics.

- Les ressources d'énergie renouvelable : les ressources, comme le vent et le soleil, sont stochastiques par leur nature, ont des caractéristiques locales et sont très difficiles à prédire.
- Les perturbations du réseau : les défauts, tels que les courts circuits, peuvent non seulement arrêter les systèmes, mais aussi, au pire des cas, détruire certains composants.

I-4.CONCLUSION :

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale des systèmes autonomes et système hybrides.

Tous les composants ont été introduits afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes. Afin de faciliter la conception, nous avons aussi mis en valeur les avantages, les inconvénients et les limites d'utilisation de ces systèmes.

Le problème d'intégration d'énergie renouvelable est bien représenté ici pour bien comprendre le comportement de système.

Dans le chapitre suivant, nous parlerons sur l'énergie éolienne et leur production d'électricité.

CHAPITRE II

GÉNÉRALITÉS SUR LES ÉOLIENNES

- LES DIFFERENTS
TYPES D'ÉOLIENNES
- LES DIFFERENTS
TYPES GÉNÉRATEURS
D'ÉOLIENNES

II -1.INTRODUCTION :

Ce chapitre comportera des généralités sur les éoliennes. Divisé en quatre parties, la première suivra l'évolution de l'utilisation de la force éolienne dans l'histoire. Dans la deuxième partie, nous définirons brièvement le concept de la machine. La troisième partie sera consacrée à la classification des éoliennes selon leur axe de rotation, les différents composants d'une éolienne à axe horizontale ainsi qu'aux différents domaines d'applications des éoliennes. La dernière partie quant à elle, comprendra la définition des différentes caractéristiques de l'énergie éolienne.

II-2.HISTORIQUE :

L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle. La première utilisation de l'énergie éolienne, et sans doute la plus simple, a été la propulsion des bateaux à voiles. Cette énergie aidait le bateau à avancer et remplaçait l'énergie des galériens.

En moyen âge, les Perses furent les premiers à utiliser des éoliennes très simples à axe vertical pour irriguer leurs cultures et aider au meulage du grain. Ce type d'éoliennes va se répandre dans tout le monde arabe puis dans l'occident suite aux croisades.

Au 16^{ème} siècle, elles ont été utilisées pour pomper de l'eau et couper le bois. En 1891, le danois Poule La Cour inventa le premier aérogénérateur qui a pour but de produire de l'électricité. Aux débuts du 20^{ème} siècle, a été marquée par la conception de la première éolienne à axe verticale, même si la puissance générée restait assez faible. Il faut attendre jusqu'à 1957 pour que la puissance atteigne les 200kW par le constructeur Danois Gedser. Mais ce n'est qu'après le premier choc pétrolier en 1973, quand les pays exportateurs de pétrole ont diminué leurs exportations que de nombreux pays se sont lancés dans le marché éolien.

Actuellement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [9].

II-3. DEFINITION :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent, c'est-à-dire le fluide en mouvement, en énergie

mécanique. Cette dernière est disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments dont la nacelle, le mât, les pales et le multiplicateur, doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative plus au moins stable à l'énergie nucléaire et d'autres d'origine fossile. Sans pour autant, prétendre à les remplacer de nos jours si nous prenons en compte l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite qui est largement plus faible. Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer. Ces dernières donnent naissance aux fermes éoliennes offshores, où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

II-4. LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

II-4.1. Les éoliennes à axe vertical :

Ces éoliennes ont un axe de rotation à la verticale du sol et presque perpendiculaire à la direction du vent. Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes.

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

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine). Ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Par ailleurs, le principe même de fonctionnement, basé sur des variations incessantes de charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité.

Enfin, pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très conséquente [9]. Les deux plus importantes conceptions d'éoliennes à axe vertical sont : Darrieus et Savonius.

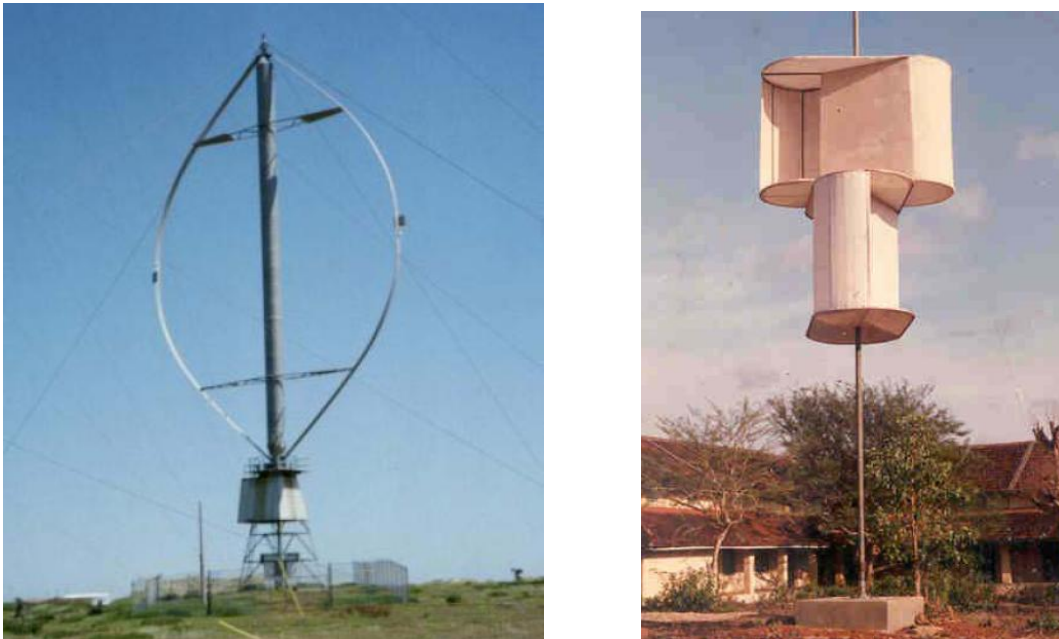


Figure II-1 Eolienne à axe vertical

II-4.2. Les éoliennes à axe horizontal :

Ces éoliennes ont leur axe de rotation à l'horizontale du terrain mais aussi presque parallèle à la direction du vent. La majorité des éoliennes présentes dans le marché appartiennent à cette catégorie [9]. Même si elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, elles présentent néanmoins un rendement aérodynamique plus élevé. De plus, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'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. Par contre, elle rend sa conception plus complexe mais aussi plus coûteuse [9].



Figure II-2 Eolienne à axe horizontal

II-5.PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL :

On présente les différents composants d'une éolienne à axe horizontal étant le sujet de notre étude (Figure II-3) [10].

- 1- Pales en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stal (décrochage aérodynamique). Freins aérodynamiques d'extrémité pivotants.
- 2- Moyeu du rotor en fonte.
- 3- Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
- 4- Paliers du rotor à double rangée de billes.
- 5- Arbre lent du rotor en acier haute résistance.
- 6- Multiplicateur de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).
- 7- Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
- 8- Accouplement avec la génératrice de type flexible.
- 9- Génératrice asynchrone de (1500kW).
- 10- Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur - génératrice.
- 11- Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmettant les signaux au système de contrôle de la turbine.
- 12- Système de contrôle surveillant et pilotant la turbine.
- 13- Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.

- 14- Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
- 15- Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.
- 16- Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.
- 17- Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

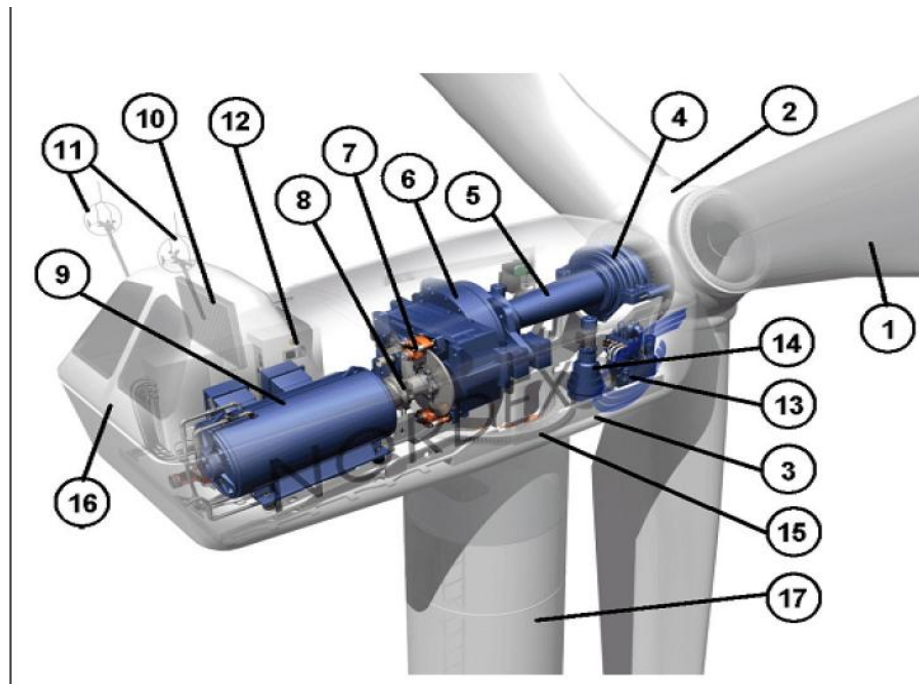


Figure II-3 Principales composantes de l'éolienne à axe horizontal

II-6. APPLICATIONS DES EOLIENNES :

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation tout en tenant compte du rendement de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

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

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

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

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne. D'une part, la complémentarité avec les moyens traditionnels de production, comme les centrales

thermiques classiques ou nucléaires et les barrages pour des régions disposant d'une infrastructure existante. D'autre part, la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement. Comme pour l'alimentation d'unités de désalinisation, la cogénération avec des groupes diesels et des panneaux photovoltaïques [9].

II-7.POTENTIEL ENERGETIQUE :

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique, le potentiel éolien disponible subit une succession de pertes, jusqu'à la sortie de l'aérogénérateur [9]. Ainsi, seule une partie de la puissance éolienne disponible sur un site donné est réellement obtenue en fin de processus.

II-7.1. Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique :

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un aérogénérateur.

En effet, si nous considérons une masse d'air m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse E_c est [9] :

$$E_c = m (1/2) V^2 \dots\dots\dots (II-1)$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être entièrement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent. La puissance instantanée fournie serait :

$$P = \rho S V^3 (1/2) \dots\dots\dots (II-2)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air.

La puissance qui peut être fourni par une éolienne est fonction de trois principaux paramètres : l'énergie éolienne disponible, la courbe de puissance de la machine ainsi que la capacité de l'aérogénérateur à réagir aux fluctuations du vent.

II-7.2.Le coefficient de puissance :

Parce que la vitesse en aval du dispositif de récupération n'est jamais nulle, la puissance ne peut être captée en sa totalité [9], le dispositif de conversion extrait une partie seulement P_m de la puissance incidente P_v .

Ainsi, la puissance P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime comme suit :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 C_p(\lambda) \dots\dots\dots (II-3)$$

Le coefficient C_p est une grandeur variable inférieure à 1, dit aussi rendement. Ce dernier est propre à chaque éolienne qui lie la puissance fournie par l'éolienne P_m est la puissance du vent disponible à l'entrée de la voilure par la relation suivante. :

$$C_p = P_m / P_v \dots\dots\dots (II-4)$$

II-7.3. Le coefficient de vitesse réduite :

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée, dite la vitesse réduite λ . Elle représente le rapport entre la vitesse tangentielle en bout de pales de la turbine et de la vitesse du vent (Figure II-4). Ainsi, la vitesse réduite est donnée par la relation suivante :

$$\lambda = \Omega R / V \dots\dots\dots (II-5)$$

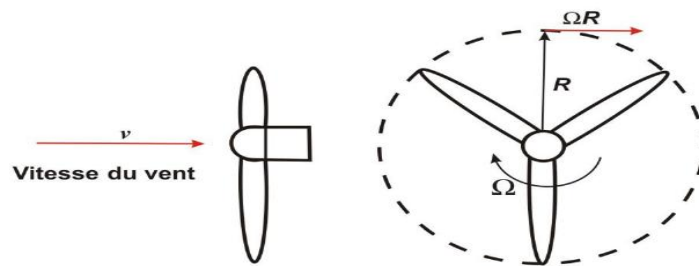


Fig. II-4 : vitesse du vent et vitesse tangentielle en bout de pales

Avec R le rayon de la voilure et Ω la vitesse de rotation.

II-7.4. Limite de Betz :

On peut estimer la valeur maximale de ce rendement, par la formule de Betz [9]. Cette dernière démontre qu'indépendamment du modèle de turbine, seuls 16 / 27^{èmes} (59 %) de l'énergie cinétique du vent peuvent être transformés en énergies mécanique. Représentant ainsi la puissance maximale qui peut être récupérée par une éolienne. C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée limite de Betz du coefficient de puissance.

$$C_p = 16/27 = 0.593 \dots\dots\dots (II-6)$$

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse réduite C_p .

II-7.5. Classement des types d'éoliennes en fonction du coefficient de puissance :

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend aussi de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse réduite λ .

$$C_p = C_p(\lambda) \dots\dots\dots (II-7)$$

Ainsi, et sur le plan aérodynamique, nous pouvons comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ comme donné dans la Figure II-5.

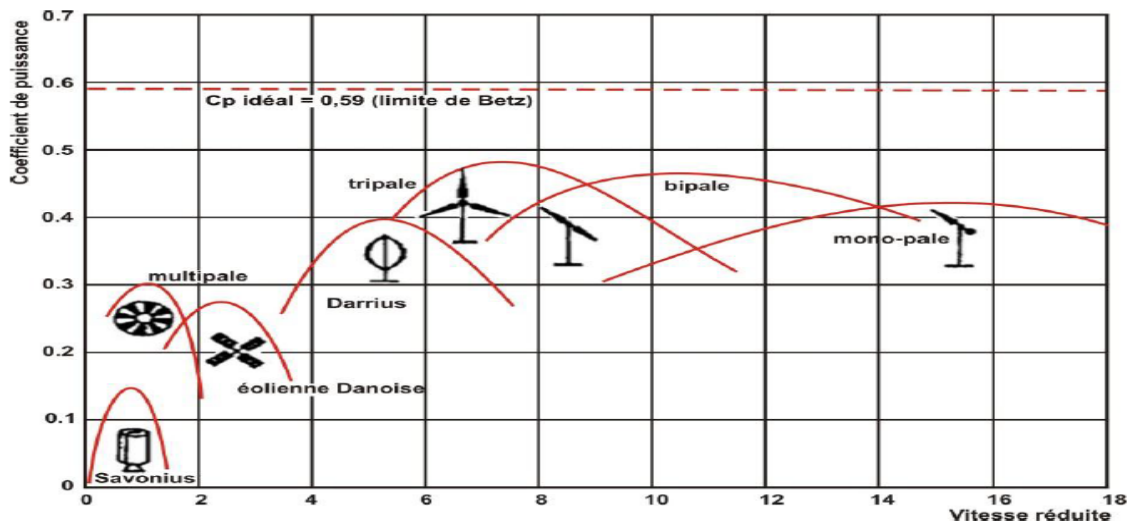


Fig. II-5 : Coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types de turbines [9]

On remarque en tout premier lieu que les éoliennes à axe horizontal, dites à vitesse rapide, possèdent potentiellement un rendement plus important que les autres formules. Ceci explique leur domination dans le marché des machines actuelles, où la courbe du coefficient de puissance atteint son maximum pour une gamme de λ comprise entre 5 et 15.

Dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse réduite. Il atteint un maximum pour une certaine valeur de λ puis diminue même avec une augmentation de la vitesse réduite. Ces variations de $C_p(\lambda)$, restent bien en dessous de la limite de Betz.

Elles dépendent de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pales utilisées.

On remarque aussi que pour une éolienne tripale, le coefficient de puissance est maximal pour $\lambda = 7$, c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse réduite que l'on maximise le rendement

aérodynamique. Il est à noter aussi, qu'à diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation bien plus élevée qu'une tripale.

Par contre, en utilisant le coefficient de couple C_c , défini par la relation :

$$C_p = \lambda C_c \dots\dots\dots (II-8)$$

On comprend tout l'intérêt des petites machines. Ainsi, et pour des λ très faibles, elles possèdent intrinsèquement un couple très important. Dans ce cas, la présence d'un nombre important de pale contribue à la création du couple de démarrage et ce, avec très peu de vent.

Par contre, dès que le vent se renforce, leurs caractéristiques de couple et de puissance s'effondrent rapidement [9].

II-8.GENERATEURS :

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans ce qui suit.

Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (GSAP) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique.

II-8.1.Générateur Asynchrone (GAS) :

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

II-8.1.1.Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE) :

Jusqu'à présent le GACE correspond au choix prépondérant de par sa simplicité, son bon rendement et une maintenance réduite [11]. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur (Figure 1.6), ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance.

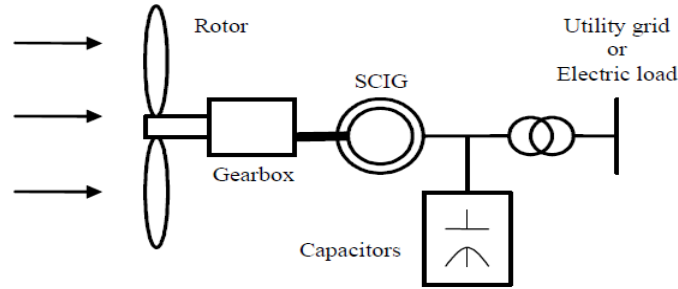


Figure II-6. Système de conversion éolien avec GACE à vitesse fixe

II-8.1.2. Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné (GARB) :

Grâce à un système de bagues et balais, la tension appliquée au rotor peut être commandée par un convertisseur électronique de puissance. De l'énergie pouvant ainsi être appliquée ou extraite du rotor, le générateur peut se magnétiser par le rotor comme par le stator [11].

II-8.1.3. Génératrice Asynchrone à double Alimentation (GADA) :

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes est connue sous le nom de génératrice asynchrone double alimentation (GADA). Celui-ci est un GARB dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur « back-to-back », qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor (Figure 1.7).

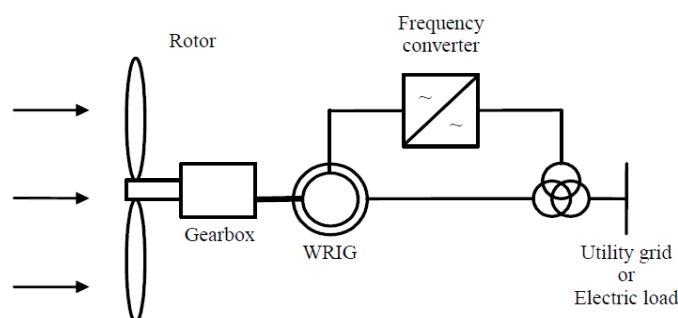


Figure II-7. Système avec GADA pour l'opération à vitesse variable

Les points forts du GADA sont :

- a) Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.
- b) Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- c) Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension.
- d) La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

II-8.2 .Générateur Synchrone (GS) :

L'avantage du générateur synchrone sur l'GAS est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du GS peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct (direct-drive) qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses (gerles). Le GS est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique (Figure II.8), lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents (GSAP) est plus simple est moins coûteux.

Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente [11].

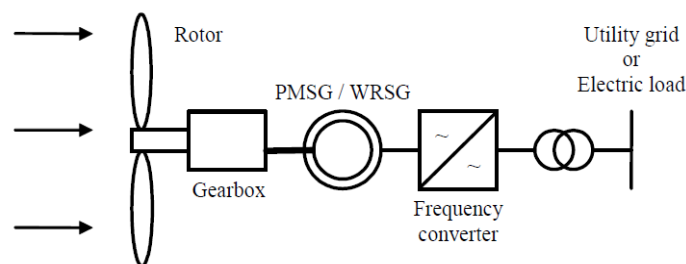


Figure II-8. Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable

II-8.2.1.Générateur Synchrone à Rotor Bobiné (GSRB) :

La connexion directe au réseau de puissance implique que le GS tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine.

L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système brushless avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable.

Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système.

II-8.2.2. Générateur Synchrones à Aimants Permanents (GSAP) :

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne [11]. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé.

Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif.

II-8.3. Autres Générateurs :

Les éoliennes raccordées au réseau de puissance nécessitent un transformateur élévateur pour adapter la tension de la machine à celle du réseau. En conséquence, la mise en œuvre de générateurs « haute tension » est une solution en cours d'évaluation. Cela permettrait, en conséquence, de diminuer les pertes par effet joule du système en éliminant le transformateur. C'est aussi au niveau de l'onduleur que cela peut-être intéressant avec des IGBT haute tension.

Dans cette optique, les machines synchrones et à induction sont des options intéressantes pour des turbines éoliennes de plus de 3 MW.

Cependant, leur coût élevé, des problèmes de sécurité et de durée de vie limitent leur commercialisation.

Les caractéristiques du générateur à réluctance commutée (GRC) sont la robustesse, une structure simple, un rendement élevé, des coûts réduits et la possibilité de fonctionner sans boîte d'engrenages. Toutefois, son adaptation aux turbines éoliennes n'a pas été étudiée en détail. Les inconvénients consistent en une densité de puissance et un rendement inférieurs à ceux du GSAP. De plus, il nécessite un convertisseur dimensionné pour toute la puissance générée.

L'utilisation du générateur à flux transversal (GFT) est aussi à l'étude. Il s'agit d'une option intéressante, encore peu évoquée pour une application aux systèmes de génération éolienne.

Ce générateur autorise un nombre de pôles élevé pour une application gerles. Cependant, le nombre de composants nécessaires et une technologie encore à ses débuts en limitent son application [11].

Une brève description de chacune de ces technologies génératrices d'éoliennes est maintenant fournie. Nous intéressons à la GADA, le principe de fonctionnement de ce type est plus détaillé dans la section suivante

II-9.MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION :

II-9.1.Principe de fonctionnement :

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système. Si pour les petites puissances (<500kW), la partie mécanique peut généralement subir les variations brutales de régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus justifiée à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne. Parmi les critères à prendre en compte pour juger de la qualité d'un tel système, on trouve :

- L'intérêt de maintenir une fréquence stator bien synchronisée par rapport à celle du réseau, afin de ne pas compromettre la stabilité d'ensemble. On peut même imaginer qu'un système „intelligent“ augmente la marge de stabilité. Ce dernier aspect peut jouer sur la limite de puissance raccordable au réseau et permet la suppression, entre stator et réseau, de condensateurs susceptibles de provoquer des résonances.

- Le rendement de la conversion ;
- Le filtrage ou la qualité des formes d'ondes injectées au réseau ;
- Le prix, évidemment.

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste gP sort par les ballais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur.

Ce réseau reçoit donc $(1+g)P$. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un balai et de collecteurs (figure II-9).

Une fois connecté au réseau un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique [12].

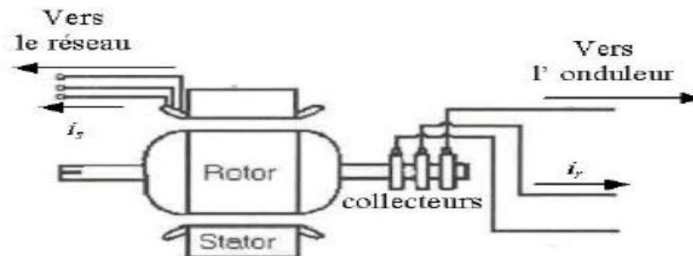


Figure II-9 : Structure de la GADA à rotor bobiné

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des *f.e.m* dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les *f.e.m* créées au rotor et au stator est :

$$E_r / E_s = (N_r / N_s) \cdot (\omega_s - \omega_{mec}) / \omega_s \dots\dots\dots (II-9)$$

N_r et N_s sont respectivement le nombre de spires des bobinages rotoriques et statoriques. ω_s et ω_{mec} sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

En posant : $g = (\omega_s - \omega_{mec}) / \omega_s$ l'équation (II-10) devient :

$$E_r / E_s = g \cdot (N_r / N_s) \dots\dots\dots (II-10)$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$I_r / I_s = N_r / N_s \dots\dots\dots (II-11)$$

Donc le rapport entre la puissance au rotor S_r et la puissance au stator S_s devient :

$$(S_r / S_s) = (I_r / I_s) \cdot (E_r / E_s) = g \dots\dots\dots (II-12)$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g .

II-9.2. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

Cette configuration (figure II-10) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [12]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir

des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

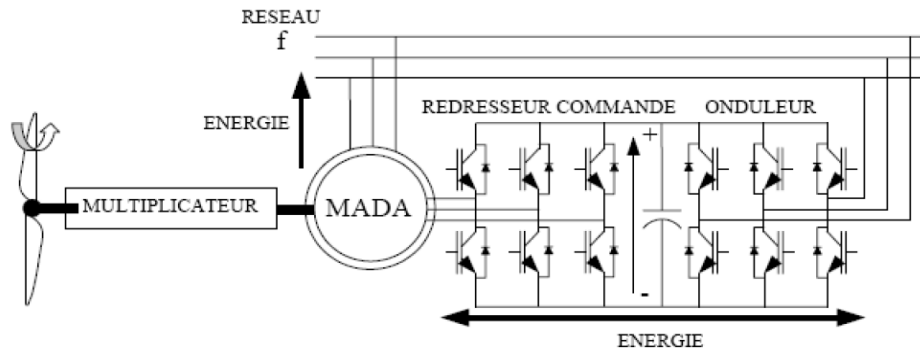


Figure II-10 : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que les autres types de GADA. Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable.

La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance.

De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau [12]. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements.

II-9.3. Mode de fonctionnement de la machine à vitesse variable :

En générale, la GADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la GADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur.

Par contre dans le cas de la GADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hypersynchronisme ou en hyposynchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [12].

- **Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone**

Le fonctionnement en mode hyposynchrone du moteur est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse s'étendant de la vitesse de synchronisme à une vitesse plus faible. Le quadrant 1-1 de la figure II-11 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator ; la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau via les convertisseurs connectés au rotor, c'est la cascade hyposynchrone.

- **Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone**

Le fonctionnement en mode hypersynchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au delà de la vitesse de synchronisme. Dans le quadrant 1-2, nous voyons que dans ce mode de fonctionnement une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor via les convertisseurs statiques et est convertie en puissance mécanique.

- **Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone**

C'est surtout le mode de fonctionnement en génératrice qui nous intéresse car il correspond parfaitement dans notre cas, à la GADA utilisée dans une éolienne. Dans le quadrant 2-1, la puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, dans notre cas la turbine éolienne ; une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

- **Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone**

Dans ce mode de fonctionnement comme le montre le quadrant 2-2, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine par la turbine éolienne est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g.P_{MEC}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

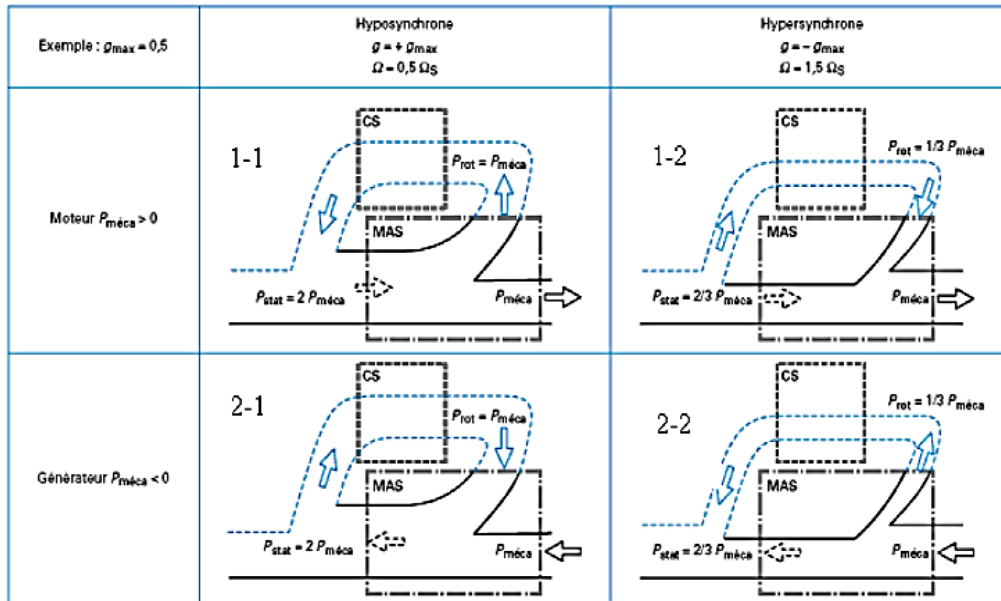


Figure II-11 : Bilans simplifiés des transferts d'énergie dans une machine à double alimentation lorsque la vitesse varie de la moitié au double de Ω [12].

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 2-1 et 2-2 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

II-10.CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la machine éolienne, en donnant les généralités sur son évolution, son utilisation, les deux grandes familles des aérogénérateurs, les différents composants d'une éolienne à axe horizontale et ses domaines d'applications. Ce deuxième chapitre nous permettra de mieux cerner le choix de l'aérogénérateur approprié pour un site avec un potentiel éolien donné.

CHAPITRE III

DIMENSIONNEMENT ET SIMULATION

- Dimensionnement
- Simulation

III-1.Introduction :

Les SEH utilisent différentes sources d'énergie comme l'éolien et le générateur diesel. Ce type de systèmes peut représenter une solution pour les régions éloignées d'un grand réseau interconnecté. Dans ce contexte, un dimensionnement correct et rentable du SEH, ainsi que l'étude du comportement dynamique du système sont très importants.

Ce chapitre présente l'architecture du SEH, obtenue après une étude de dimensionnement. Cette architecture inclut une éolienne, un générateur diesel pour interconnecter les sources. Le dimensionnement d'un tel système implique la détermination des caractéristiques nominales des sources, pour des ressources énergétiques et des contraintes d'utilisation données.

III-2.Méthodologie adoptée :

La méthode adoptée pour le dimensionnement du système hybride s'effectue comme suit :

1. description de site étudié et leur profil de consommation d'énergie électrique représentatif du site (isolé).
2. Choix de l'éolienne.
3. Détermination de la taille du générateur diesel.

III -2.1.Description du profil de consommation d'énergie électrique du site :

Le site étudié est une petite ville éloigné de réseau électrique dans le nord de Sahara algérienne région Hassi R'Mel.

Les principaux consommateurs de cette ville sont des maisons et des petites industries. Les charges électriques des maisons sont généralement l'éclairage, le chauffage et le fonctionnement des appareils électriques (réfrigération, ordinateurs, téléviseurs....). Les appareils électriques principaux des petites industries sont des moteurs électriques. Les profils de la charge quotidienne (voir à l'annexe) de cette ville est illustré dans le tableau (III-1), la consommation journalière de site d'une puissance 79 KWh/j et une puissance moyenne journalière de 3.2 MW.

Le tableau III-1 : La consommation de la charge chaque heure.

Heurs	Charge (KW)	Heurs	Charge (KW)
00:00 – 01 :00	2500	12:00 – 13 :00	3701
01:00 – 02 :00	2700	13:00 – 14 :00	3700
02:00 – 03 :00	2400	14:00 – 15 :00	3700
03:00 – 04 :00	3600	15:00 – 16 :00	3700
04:00 – 05 :00	3200	16:00 – 17 :00	3700
05:00 – 06 :00	3100	17:00 – 18 :00	3600
06:00 – 07 :00	3700	18:00 – 19 :00	3500
07:00 – 08 :00	3700	19:00 – 20 :00	3100
08:00 – 09 :00	3700	20:00 – 21 :00	2900
09:00 – 10 :00	3700	21:00 – 22 :00	2880
10:00 – 11 :00	3700	22:00 – 23 :00	2300
11:00 – 12 :00	3700	23:00 – 00 :00	2200

III-2.2. Description du profil de vent du site :

Dans une étude [9] de la vitesse du vent en Algérie sur une période de 9 ans (2001-2010), on constate que la vitesse du vent dans la région nord Sahara est faible (moyenne 3.784 m/s, maximal 8.21m/s, minimal 1.93 m/s) et moyenne dans le sud-ouest (région d’Adrar).

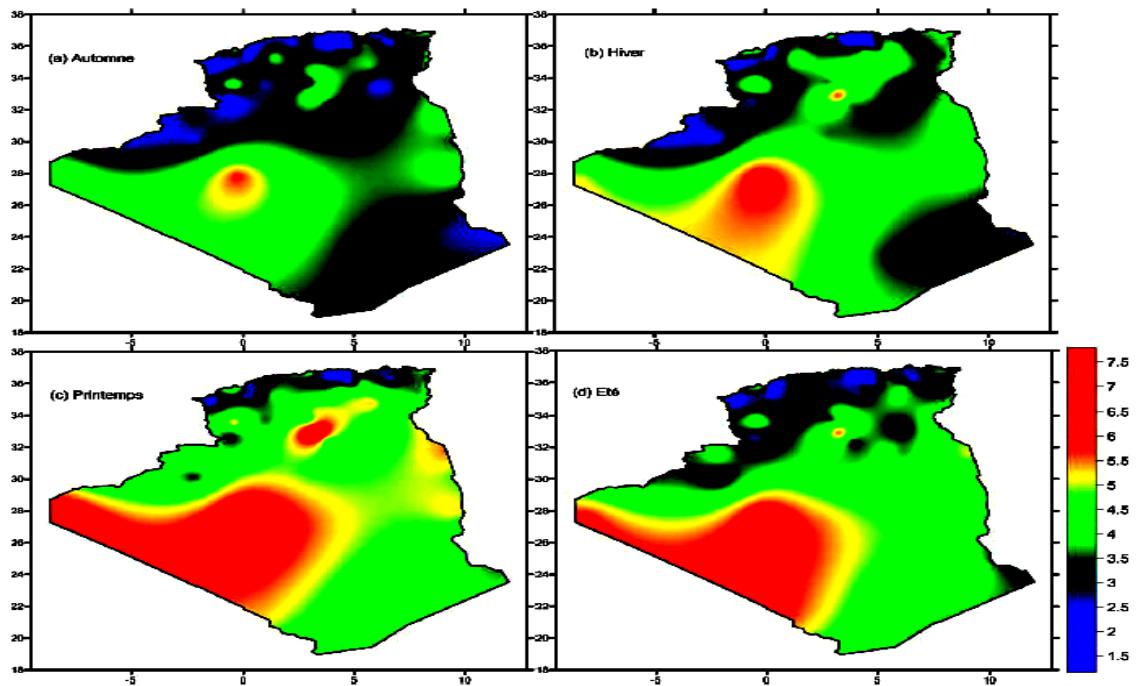


Figure III-1: Carte saisonnière des vents à 10m du sol (m/s) [9]

**Le tableau III-2 : Variations mensuelles de la vitesse moyenne à 10 m sites
au Nord du Sahara [9]**

Stations	Béchar	Hassi R'Mel	Ain-Safra	El-oued
Paramètre	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
Janvier	2.61	5.57	2.26	2.29
Février	3.25	5.75	2.63	2.63
Mars	4.19	6.79	2.97	3.34
Avril	4.94	7.80	3.28	4.85
Mai	5.17	8.21	3.24	4.01
Juin	4.50	7.53	2.80	3.63
Juillet	4.29	5.66	2.40	3.33
Aout	4.02	5.75	2.54	3.14
Septembre	3.87	5.70	2.39	2.92
Octobre	3.31	5.03	2.10	2.16
Novembre	2.98	4.92	2.05	1.93
Décembre	2.59	5.21	2.17	2.25

Nous remarquons que le vent dans la région Hassi R'Mel est le plus élevé dans la zone nord Sahara qui justifier notre choix.

III-3. Dimensionnement des sources :

Pour la raison que la vitesse du vent est faible, nous avons choisis dans notre étude un niveau de pénétration faible. Donc :

- GD fonction sans arrêt (source principale), il faut qu'il alimente la charge maximale
- La production renouvelable réduit la charge du diesel
- l'énergie éolienne alimente la charge principale
- il n'y a pas de système de supervision
- le système de stockage est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme pour cela nous n'avons pas l'étudié dans notre exemple.

III-3.1. choix d'éolienne :

L'éolienne choisie a les caractéristiques suivantes :

- Puissance nominal: 1500 kW à vitesse de vent de 6 m/s
- Tension : 2200 Vdc configurable.
- Vitesse de démarrage : 2 m/s

- Vitesse du vent maximale : 12 m/s

III-3.2. choix de générateur diesel :

En vue du caractère non régulier des ressources renouvelables, un générateur diesel est nécessaire comme une source principale. Le générateur développe une puissance maximale de 4100 kVA pour satisfaire un pic de charge de 3700kVA.

III-4 .Validation de dimensionnement du système hybride moyennant le logiciel HOMER :

Nous validons notre choix par un logiciel de dimensionnement. Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement et de simulation des systèmes à énergie hybride [13] : HOMER, SOMES, RAPSIM, SOLSIM, INSEL.....Tous ces logiciels ont pour but d'optimiser les systèmes hybrides, mais les stratégies d'optimisation sont différentes.

III-4.1 .Description du logiciel HOMER :

C'est un outil développé par National Renewable Energy Laboratory (NREL), capable de dimensionner et d'optimiser un système hybride contenant différents composants : éolienne, PV, micro-hydrocentrale, diesel, réseau, pile à combustible et batteries.

HOMER exécute des simulations pour toutes les configurations possibles du système pour les 8670 heures, dans le but d'avoir si elles sont réalisables. Il estime ensuite le coût d'installation et de fonctionnement du système et propose une liste des configurations, classées par rapport au coût de leur cycle de vie.

HOMER utilise les valeurs moyennes mensuelles annuelles de l'irradiation solaire et la vitesse du vent du site d'implantation du système hybride pour réaliser son dimensionnement, ces valeurs sont disponibles dans la base de données fournie par le logiciel,

Les ressources locales (vitesse du vent) et le profil de charge sur une année utilisés pour réaliser le dimensionnement du SEH sont illustrés dans les Figure (III-2), Figure (III-3).

Le Figure (III-2) présente le profil de vent, une valeur moyenne de la vitesse du vent de 3.784 m/s. Le profil de charge est illustré dans la Figure (III-3). Il s'agit d'une charge avec une valeur moyenne annuelle de 79000 kWh/j et un pic de puissance instantanée de 3700 kW.

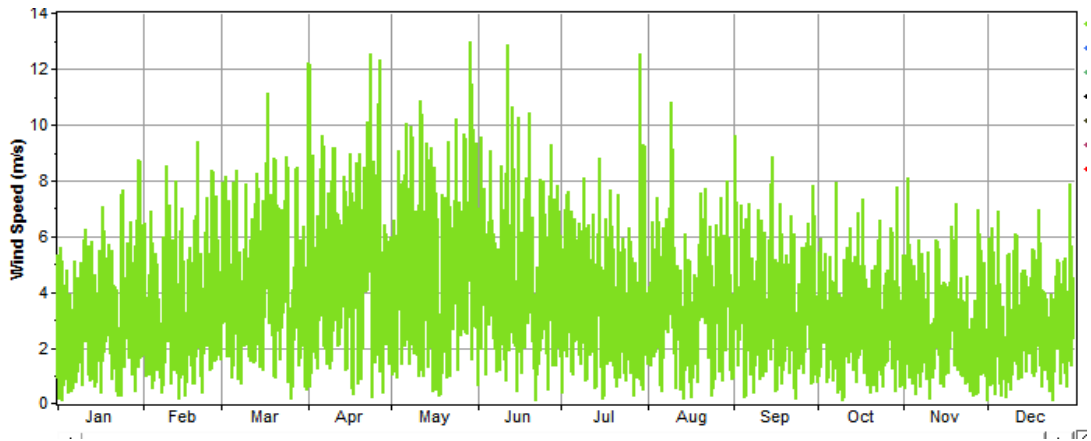


Figure III-2: Profil du vent

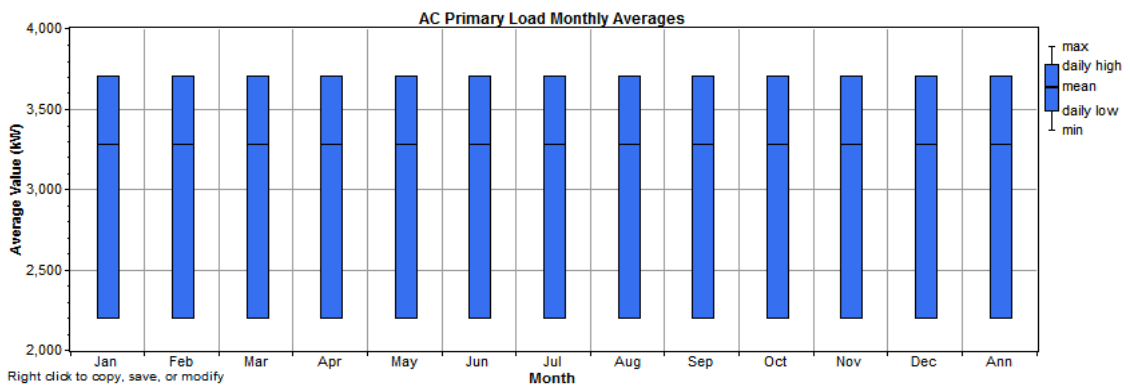


Figure III-3: Profil de charge annuelle

Nous choisissons un seul éolienne de 1500kW et un seul diesel de 4100 KVA.

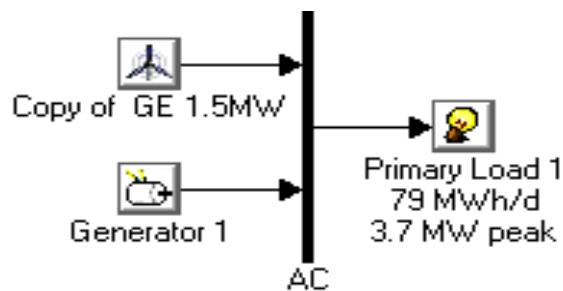


Figure III-4 : Architecture du SEH

La production et la consommation d'énergie sur une année sont détaillées dans les Tableaux (III-3 et III-4). On voit que l'éolienne produit 19% de l'énergie annuelle qui valide notre choix

Tableau III-3 : Energie annuelle produite **Tableau III-4 :** Energie annuelle consommée

Production	kWh/yr	%
Wind turbine	5,556,079	19
Generator 1	23,238,696	81
Total	28,794,774	100

Consumption	kWh/yr	%
AC primary load	28,720,516	100
Total	28,720,516	100

La puissance moyenne mensuelle produite par les sources du SEH est illustrée dans la Figure (III-5). On remarque que la puissance de l'éolienne présente 40% (<50%) de la puissance de pic de charge (voir la équation I-1), qui justifié aussi notre choix.

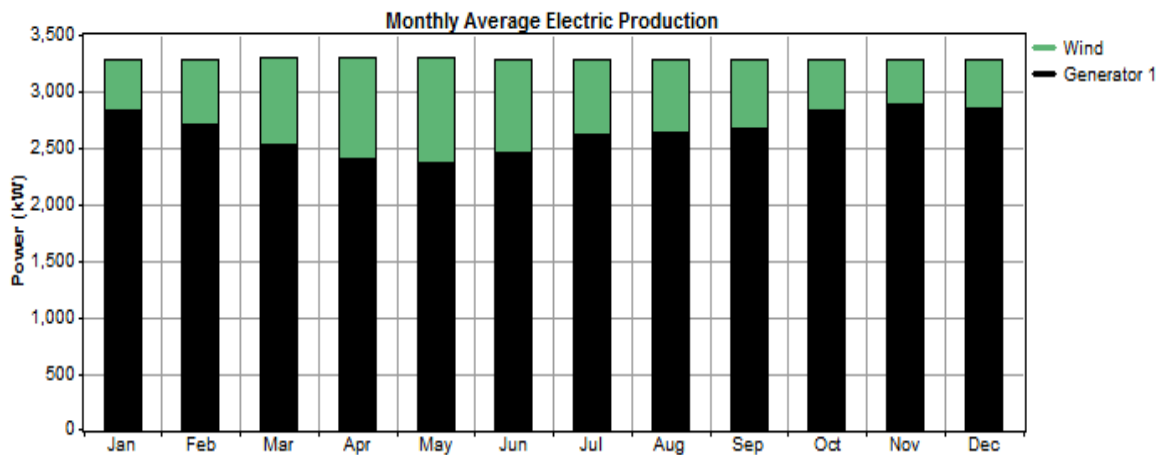


Figure III- 5: Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source

III-5 .Descriptions des blocs utilisés en Matlab/Simulink :

III-5.1.Système éolien :

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique.

En général, la transmission de puissance entre le moyeu et le générateur électrique est réalisée à travers un multiplicateur de vitesse de rotation.

Le schéma-bloc de l'éolienne étudiée dans le cadre de ce travail est présenté dans la Figure (III-6). Il s'agit d'une éolienne à axe horizontal, à trois pales et avec un générateur à MADA à vitesse variable.

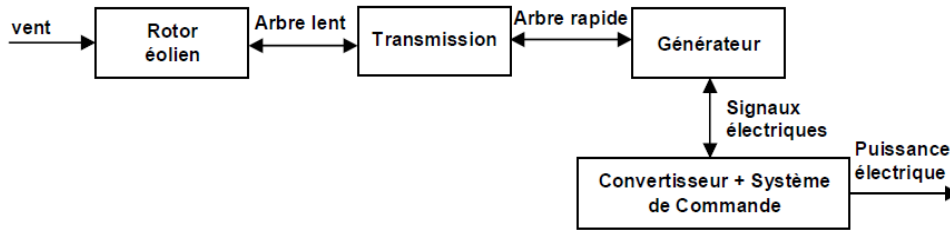


Figure III-6 : Structure du système éolien

III-5.1.1. Modèle éolienne utilisant SimPowerSystem Toolbox :

C'est un modèle basé sur les caractéristiques de puissance à l'état d'équilibre de la turbine. La rigidité du train d'entraînement est infinie, le coefficient de frottement et le moment d'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la turbine. L'utilisateur introduit les paramètres électriques et mécaniques de son éolienne. Dans ce modèle, A, B, C constituent les sorties du générateur triphasé. La sortie m est le vecteur de mesures, dans lequel on retrouve la puissance active et réactive, le couple et la vitesse de la turbine. L'entrée « Trip » est participative à la boucle de contrôle de la turbine, alors que « Wind » est une entrée pour la vitesse du vent (voir figure III.7).

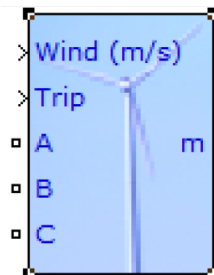
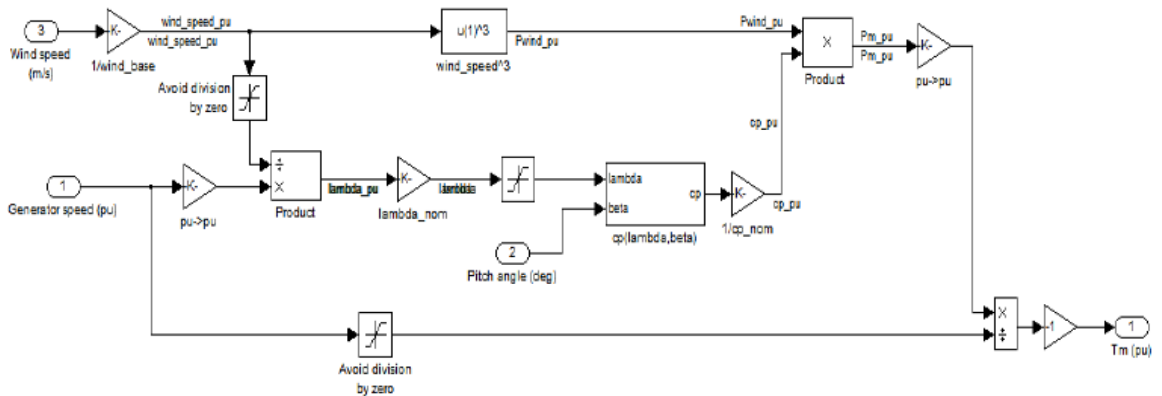


Figure III-7: Block de l'éolienne sous SimPowerSystem

III-5.1 .2. Le modèle de turbine :

Le modèle de la turbine éolienne est illustré dans la figure (III.8). Les trois entrées sont la vitesse de la génératrice (Generator speed), l'angle d'inclinaison en degrés des pales (Pitch angle) et la vitesse du vent (Wind speed) en m/s. La sortie est le couple appliqué sur l'arbre du générateur.



La figure III-8 : paramétrage d’une turbine éolienne utilisant le modèle sous SimPowerSystem.

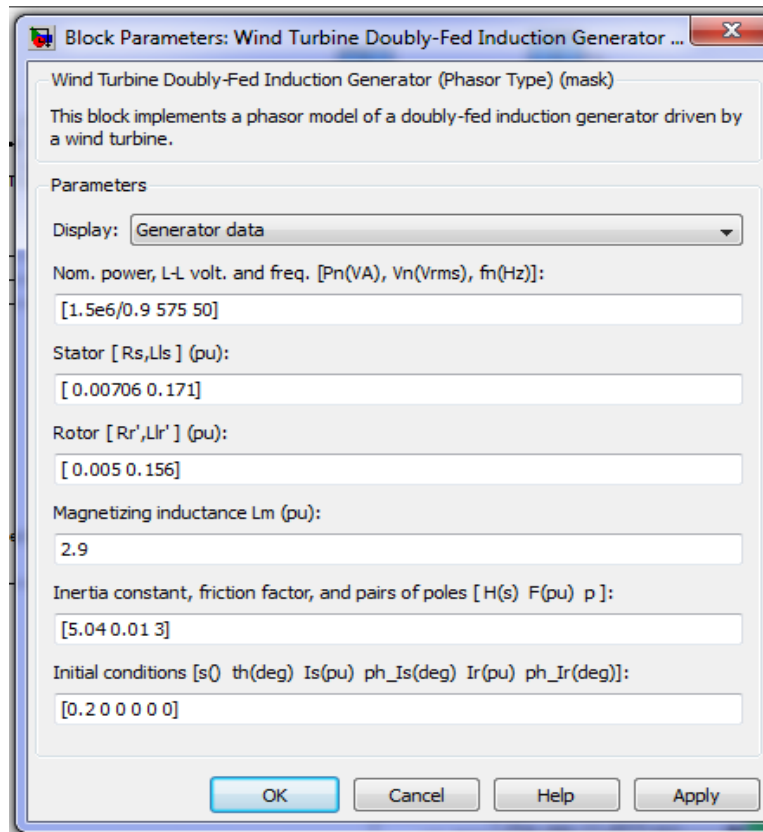


Figure III-9: Paramètres de la turbine éolienne sous SimPowerSystem

La caractéristique de cheminement est une vitesse de démarrage de 2 m/s et une vitesse nominale de 6 m/s (voir figure III.10).

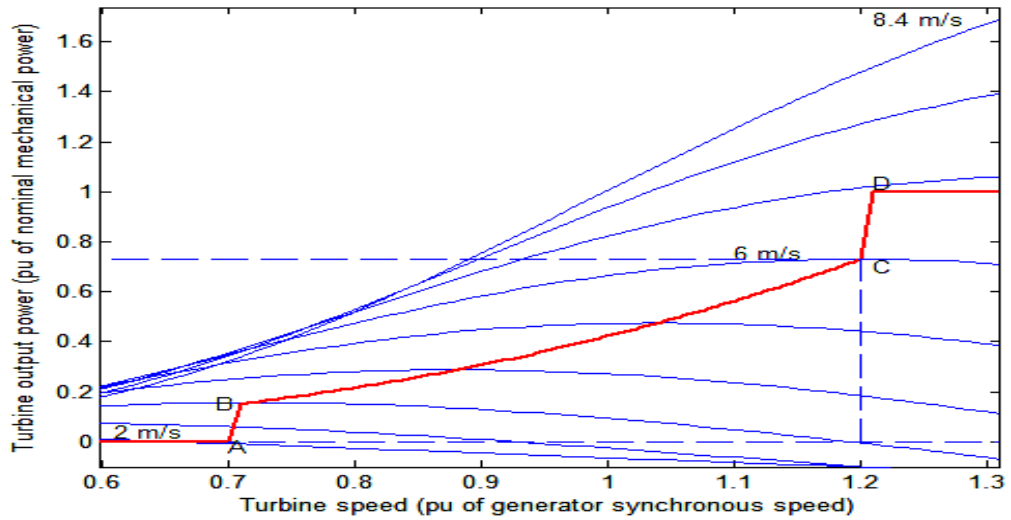


Figure III-10 : Caractéristiques de turbine et caractéristique de Cheminement

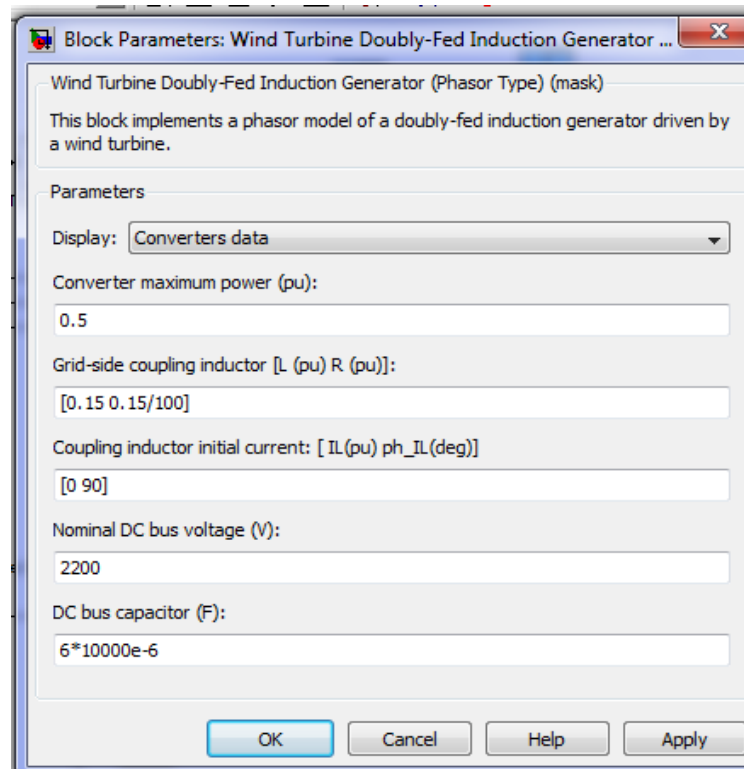


Figure III-11: Paramètres du convertisseur turbine éolienne sous SimPowerSystem

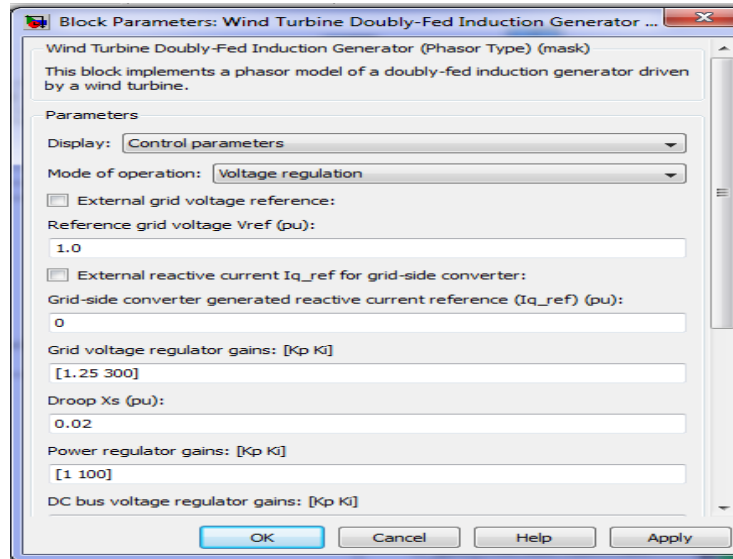


Figure III-12: Paramètres du le système contrôle de turbine éolienne sous SimPowerSystem

III-5.2.Générateur diesel :

Comme indiqué dans le générateur diesel est en général constitué d'un moteur diesel et d'un générateur synchrone. Le modèle dynamique complet du groupe électrogène diesel suppose la modélisation du moteur diesel avec la boucle de réglage de la vitesse et du générateur synchrone avec le système de réglage de la tension.

III-5.2.1.Moteur diesel et régulateur de vitesse :

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 [5].

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 sur le mécanisme d'accélération, en fournissant le carburant sans variations abruptes et répond en finesse aux variations de charge.

De nombreux ouvrages proposent des modèles plus ou moins complexes du moteur diesel, en fonction de la disponibilité des données constructeurs. Cependant, l'expérience et les mesures en exploitation ont montré que pour étudier la réponse du système face aux perturbations rapides de vitesse, il peut suffire d'utiliser un modèle simple [5]. Le diagramme bloc d'un moteur diesel simplifié et celui du régulateur de vitesse respectivement sont illustrés dans la Figure (III-13).

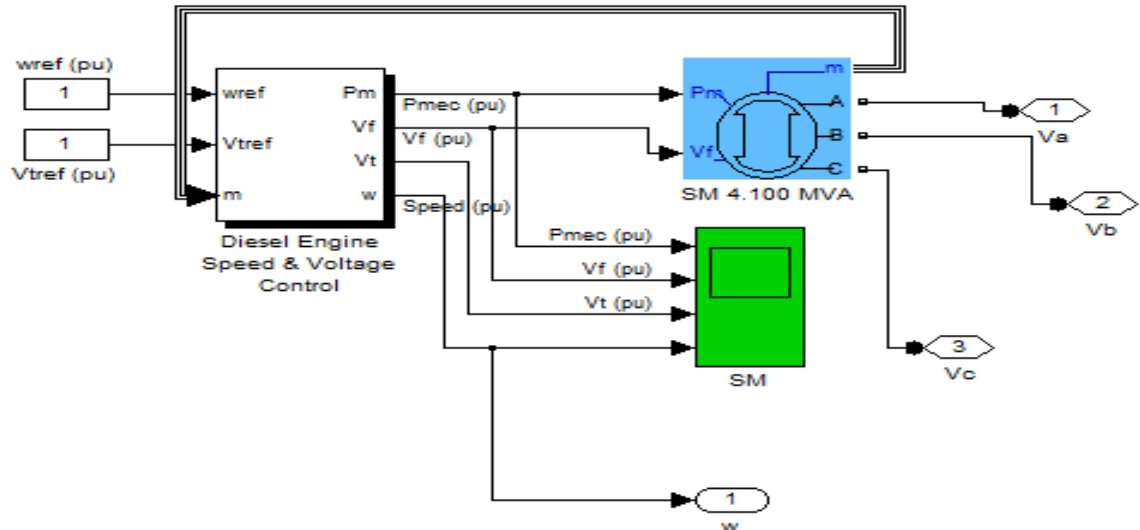


Figure III-13 : Bloc d'un moteur diesel simplifié et du régulateur de vitesse

L'entrée du régulateur de vitesse est l'erreur de vitesse de rotation et la sortie est le signal de commande de l'actionneur. Les paramètres du régulateur de vitesse sont le statisme et le facteur intégrateur, il donne la paramètre dans la [5]. L'objectif de l'intégrateur est d'éliminer l'erreur statique de la vitesse.

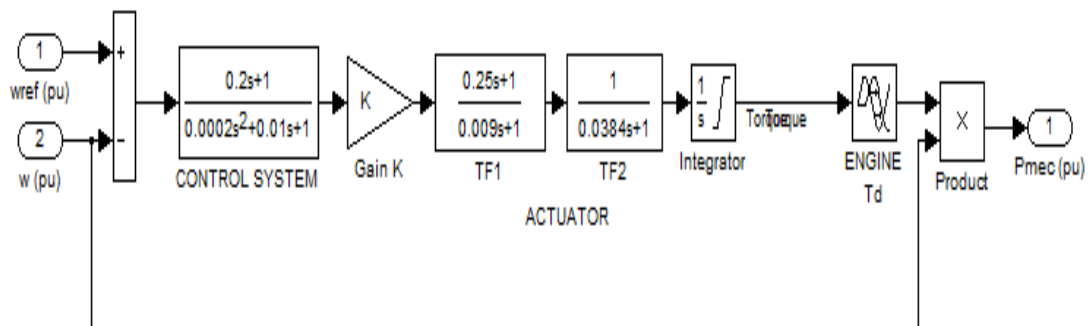


Figure III-14 : Bloc d'un actionneur

La relation entre le couple et la consommation de carburant et une constante de temps τ . Cette constante de temps dépend de la température du carburant.

Dans le cas d'un réseau isolé ayant comme source principale le générateur diesel, celui-ci est chargé de fixer la fréquence du réseau et de garder l'amplitude de la tension constante.

Par conséquent, le modèle du moteur diesel se réduit à une constante qui fixe la puissance de la machine synchrone.

III.5.2.2 Modèle simplifié de la machine synchrone :

La puissance mécanique fournie en sortie du bloc « moteur diesel » est convertie en puissance électrique par un modèle simplifié [5] de la machine synchrone. Les parties mécanique et électrique de la machine sont modélisées dans le même bloc.

Le rotor de la machine synchrone est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation I continu créant un champ magnétique $2p$ polaire. Il possède donc p paires de pôles. Le même nombre de pôles se retrouve dans le stator. Ses enroulements sont le siège de courants alternatifs triphasés. La liaison entre la pulsation ω_g du champ magnétique tournant et la vitesse de rotation est :

$$\Omega_s = \omega_g / p \dots\dots\dots (III-1)$$

Avec $\omega_g = 2\pi f$ où f est la fréquence des courants alternatifs en Hz.

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une force électromotrice $e(t)$ de valeur efficace E :

$$E = K N \Phi f = K N \Phi p n_s = K' \Phi n_s \dots\dots\dots (III-2)$$

où:

- K : coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)
- N : nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)
- Φ : flux maximum à travers un enroulement [Wb]
- n_s , : vitesse de rotation [rpm]
- $K' = K N_p$: constante globale (caractéristique de la machine)

Le modèle équivalent d'un enroulement du générateur synchrone est montré dans la Figure III- 15

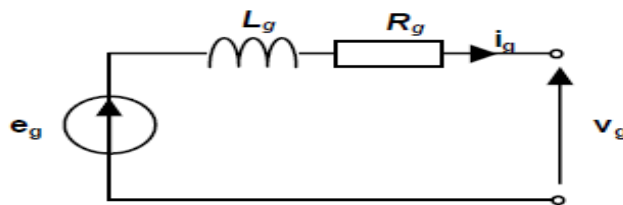


Figure III-15 : Modèle équivalent d'un enroulement

e_g : f.é.m. à vide [V]

V : tension aux bornes d'un enroulement de la machine [V] R_g : résistance de l'enroulement

L_g : inductance synchrone [H]

La loi des mailles pour le schéma présenté dans la Figure III-15 avec les grandeurs instantanées est :

$$e_g = R_g i_g + L_g di_g/dt + V_g \dots\dots\dots(III-3)$$

En triphasé, le stator comporte trois enroulements et donc trois forces électromotrices $e_{g1}(t)$, $e_{g2}(t)$ et $e_{g3}(t)$ de même valeur efficace E et déphasées de $2\pi/3$.

Dans le modèle simplifié de la machine synchrone, la partie mécanique sans frottement est décrite par l'équation:

$$J_{ds} d\Omega_s / dt = T_d - N T_{em_g} \dots\dots\dots(III-4)$$

Où:

J_{ds} est l'inertie totale de l'ensemble moteur diesel générateur synchrone;

Ω_s est la vitesse de rotation;

T_d est le couple mécanique sur l'arbre ;

T_{em_g} est le couple électromagnétique.

III-6.1.1. Variation climatique (vent):

La première simulation consiste à fixer la valeur de charge à une puissance de 3.5MW, facteur de puissance 0.8, puis on va varier la vitesse du vent.

Paramètres de simulation : temps de simulation 50s, vitesse initiale du vent 4m/s, vitesse finale du vent 6m/s et le instant de variation 20s.

Etude de la puissance active figure III-17 :

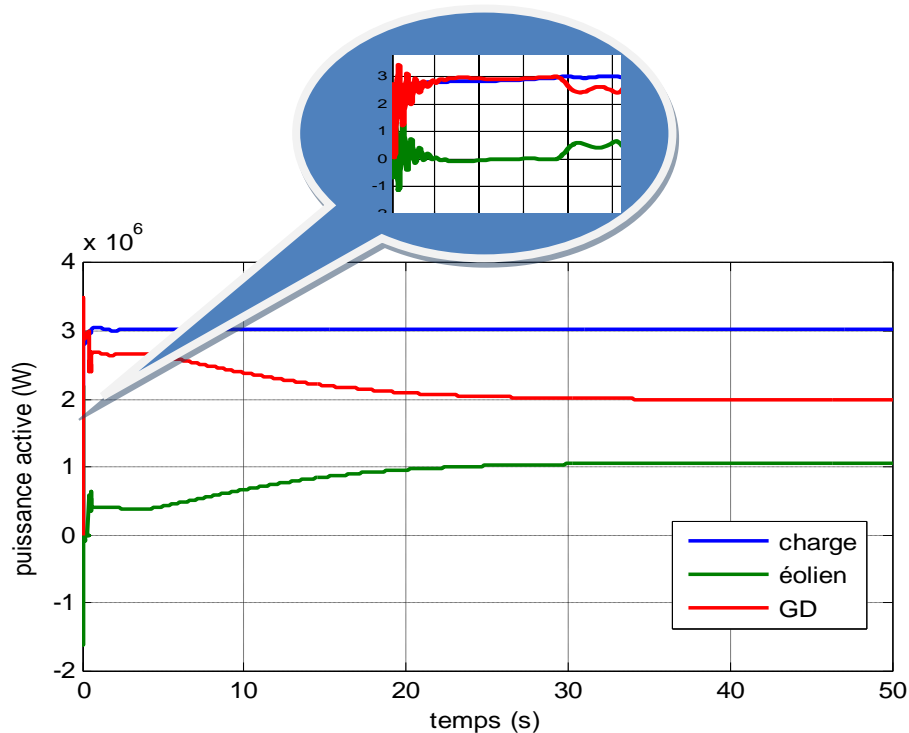


Figure III-17 : La puissance active

Nous avons appliqué à notre éolienne une vitesse du vent de 4 m/s à partir du temps 0s, et en à augmenter la vitesse du vent à 6 m/s à partir du temps 20s.

On remarque par période :

Dans la période [0s, 0.4s] :

- L'éolien est en arrêt et le groupe diesel fournit seul la puissance active à la charge. La charge consomme la puissance active produite des deux machines (MS, MAS)

Dans la période [0.4s, 20s] :

- la puissance active de la charge est stable.
- La puissance active d'éolienne et de groupe diesel sont stables parce que n'est pas de variation du vent.

Dans la période [20s, 40 s] :

- La puissance active de l'éolienne augmente à cause de la variation de vitesse du vent du 4 m/s au 6 m/s, cette variation suit la courbe de cheminement de la turbine éolienne.
- La puissance active de groupe diesel diminue, elle complète le reste de puissance demandé par la charge. Donc, il y a une relation complémentaire entre la puissance

active d'éolienne et celle de groupe diesel dans système hybride.

Dans la période [40 s, 50 s] :

- Les puissances actives d'éolienne et de groupe diesel sont stables parce que n'est pas de variation du vent.

Etude de la puissance réactive figure III-18 :

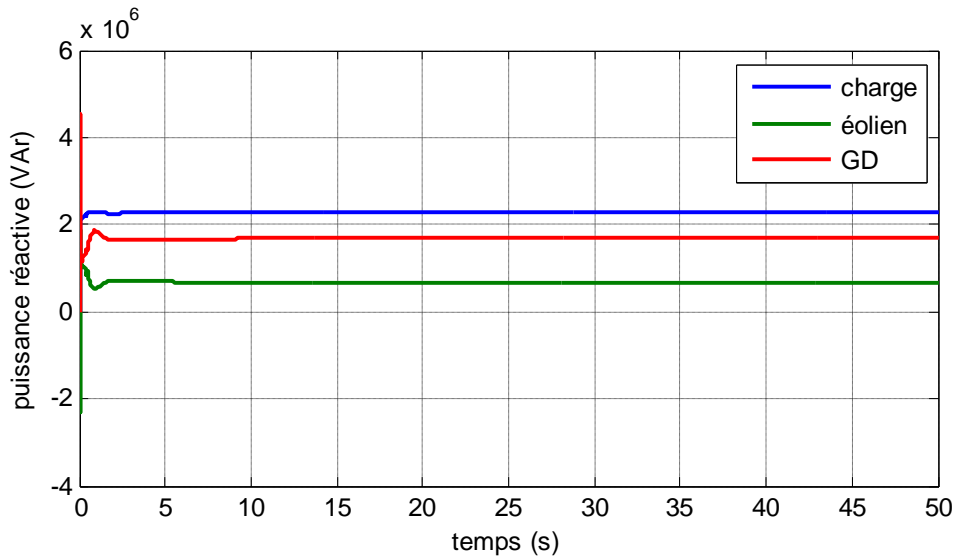


Figure III-18 : La puissance réactive

Dans la période [0s, 0.4s] : démarrage de l'éolienne

- Au cours de démarrage, l'éolienne consomme une puissance réactive. le diesel fourni la totalité de la puissance réactive de la charge et de l'éolienne.

Dans la période [0.4 s, 50 s]:

- Les puissances réactives de groupe diesel et d'éolienne sont stables. L'éolienne injecte au réseau une puissance réactive.

Etude de la fréquence figure III-19 :

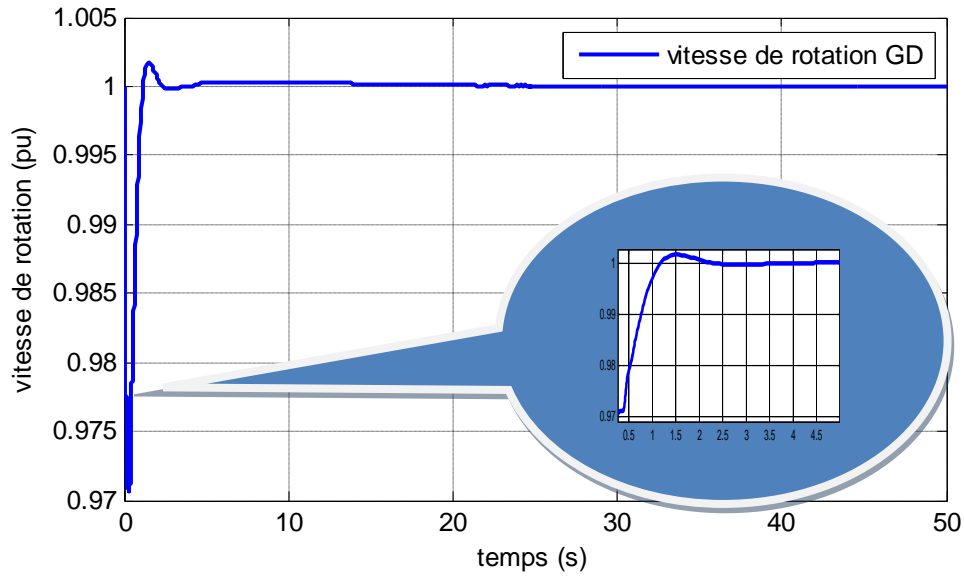


Figure III-19 : La vitesse da rotation du GD

Dans la période [0s, 0.4s] :

- On remarque une petite variation (-3% à 0.2%) de fréquence à cause de démarrage de groupe diesel

Dans la période [0.4 s, 50s]:

- Une stabilisation de la vitesse de groupe diesel (c'est à dire une stabilisation dans la fréquence) malgré qu'il y a une variation du vent.

Etude de la tension figure III-20 :

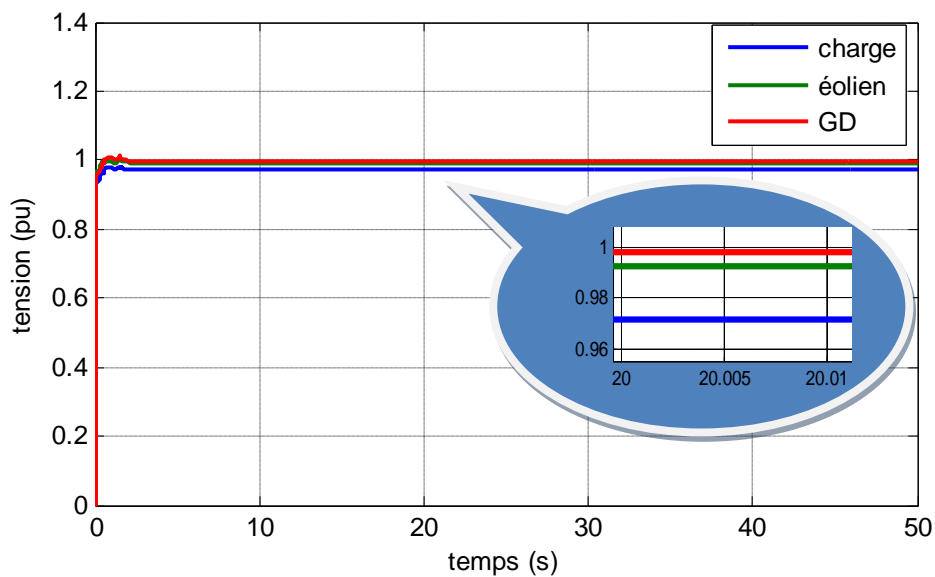


Figure III- 20 : Les tensions

Dans la période [0s, 0.4s] :

- On remarque une augmentation de tension de groupe diesel à cause de démarrage de groupe diesel

Dans la période [0.4 s, 20s]:

- Une stabilisation de les tensions de groupe diesel et de l'éolien

Dans la période [20s]:

- On remarque une petite variation dans les tensions à cause de variation dans la charge.

Dans la période [20 s, 50s]:

- Les tensions roture un régime stable à cause de n'est pas de variation dans la charge.

-

III-6.1.2. Variation de la charge :

Pour voir l'effet de variation de la charge, Nous simulons notre réseaux une charge principale de 3.2MVA et place une charge secondaire de 0.8MVA avec un facteur de puissance 0.8 dans les deux charges. Puis dans l'instant 20s, on débranche la charge secondaire (diminution de 20%).

Etude de la puissance active figure III.21 :

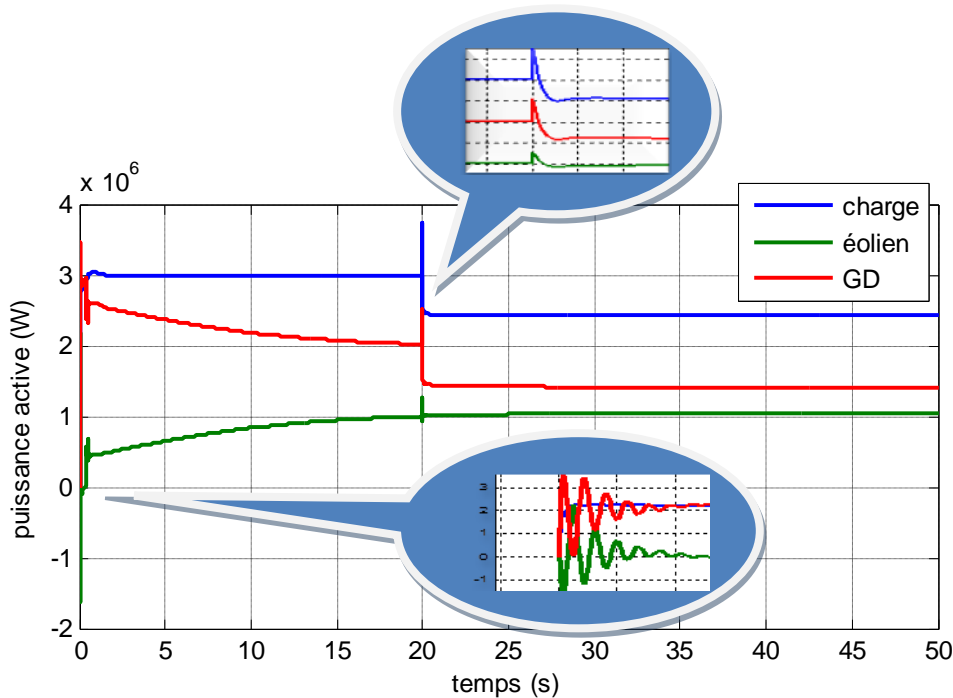


Figure III-21 : La puissance active

Toujours le groupe diesel complète la puissance active demandé par la charge et il agit seul avec la fluctuation de cette charge si la vitesse du vent est stable (puissance de l'éolienne stable).

Etude de la puissance réactive figure III-22 :

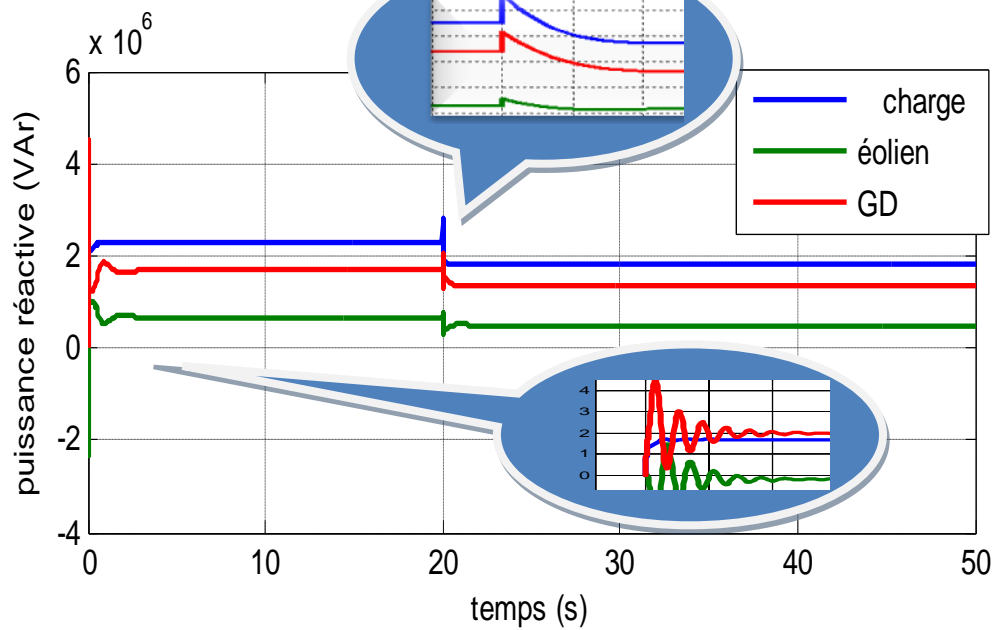


Figure III-22 : La puissance réactive

On remarque que si la puissance réactive de la charge diminue les puissances réactives injectées des deux sources diminuent aussi.

Dans la période [0s, 20s] :

- L'éolien fourni une puissance réactive de 0.7 MVar
- Le diesel fourni la puissance réactive de 1.7 MVar
- La puissance réactive de la charge est 2.4 MVar .

Dans la période [20 s, 50 s]

- La puissance réactive de L'éolienne diminue jusqu'à 0.5 MVar.
- La puissance réactive du groupe diesel diminue jusqu'à 1.3 MVar.
- La puissance réactive de la charge est 1.8 MVar.

Etude de la fréquence figure III-23 :

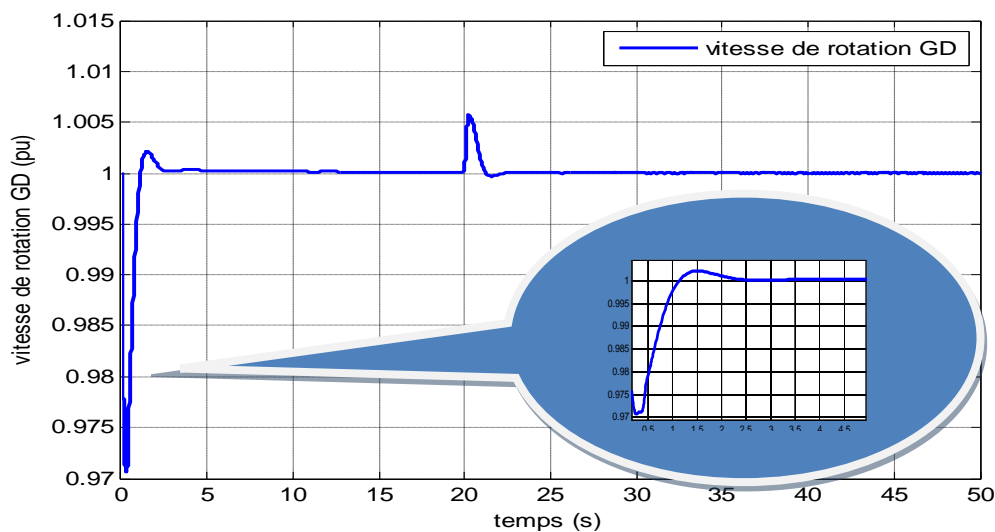


Figure III-23 : La vitesse de rotation du GD

On observe une petite augmentation de la fréquence dans l'instant 20s, cette augmentation est due à cause de la variation de la puissance de groupe diesel (la variation de la vitesse de rotation de la machine synchrone est proportionnelle à la variation de puissance ($P_m - P_e$)).

Etude de la tension figure III-24 :

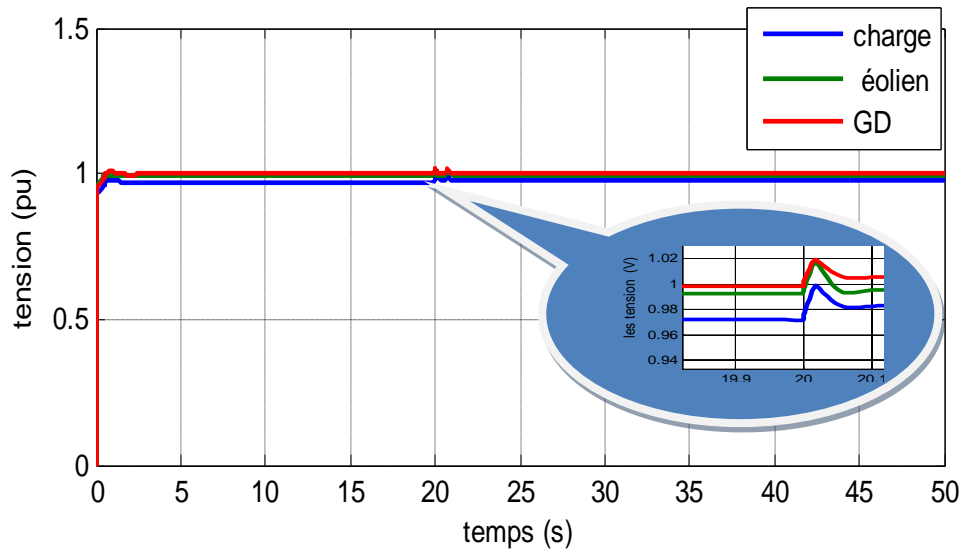


Figure III-24 : Les tensions

Dans la période [0s, 0.4s] :

- On remarque une augmentation de tension de groupe diesel à cause de démarrage de groupe diesel

Dans la période [0.4 s, 10s]:

- Une stabilisation de les tensions de groupe diesel et de l'éolien

Dans le temps [20s]:

- On remarque une petite variation dans les tensions à cause de variation à la charge.

Dans la période [20 s, 50s]:

- Les tensions retrouvent un régime stable à cause de les régulateurs de tension dans l'éolien et le groupe diesel.

III-6.1.3 .Démarrage d'éolienne :

Dans ce cas, on fixe la valeur de charge à 3.2 MVA et la vitesse du vent 6m/s. l'éolien est en arrêt puis elle démarre à l'instant 10s. Le temps de simulation est 50s.

Etude de la puissance active figure III-25 :

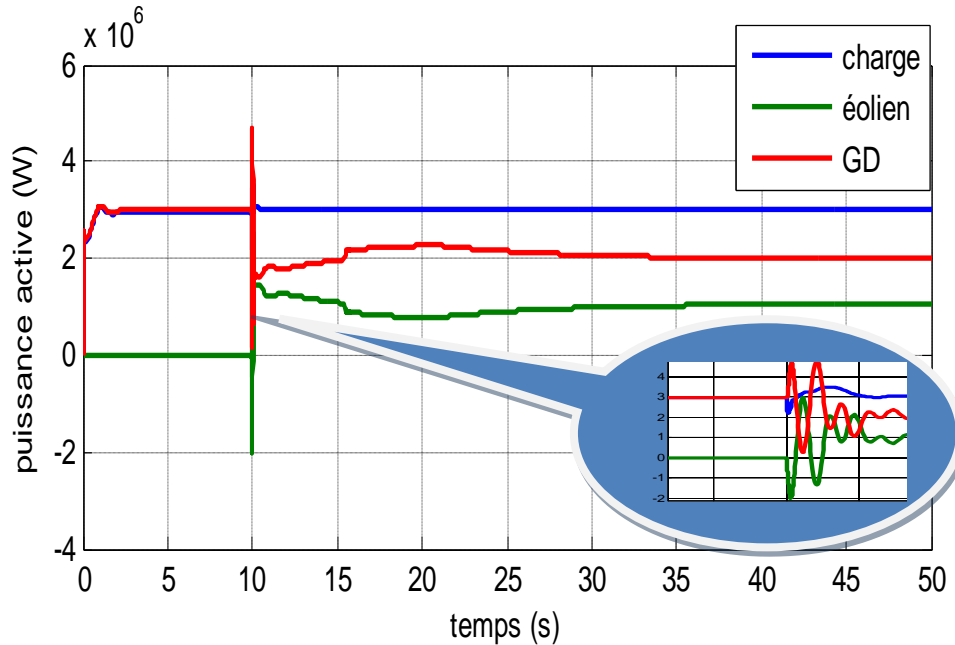


Figure III-25 : La puissance active

Dans la période [0s, 10s]:

- L'éolien est arrêté et le diesel est fourni seul la puissance active à la charge.

Dans le temps 10 s :

- La puissance active de la charge est stable.
- L'éolienne consomme une énergie réactive.
- Le groupe diesel fourni de l'énergie réactive à la charge et l'éolienne.

Dans la période [10s, 30s]:

- La puissance active de groupe diesel augmente, elle complète le reste de puissance demandé par la charge. Donc, il y a une relation complémentaire entre la puissance active d'éolienne et celle de groupe diesel dans système hybride

Dans la période [30 s, 50 s] :

- La puissance active de la charge est stable.
- La puissance active d'éolienne est stable.
- La puissance active de groupe diesel est stable parce que n'est pas de variation de la puissance éolienne.

Etude de la puissance réactive figure III-26 :

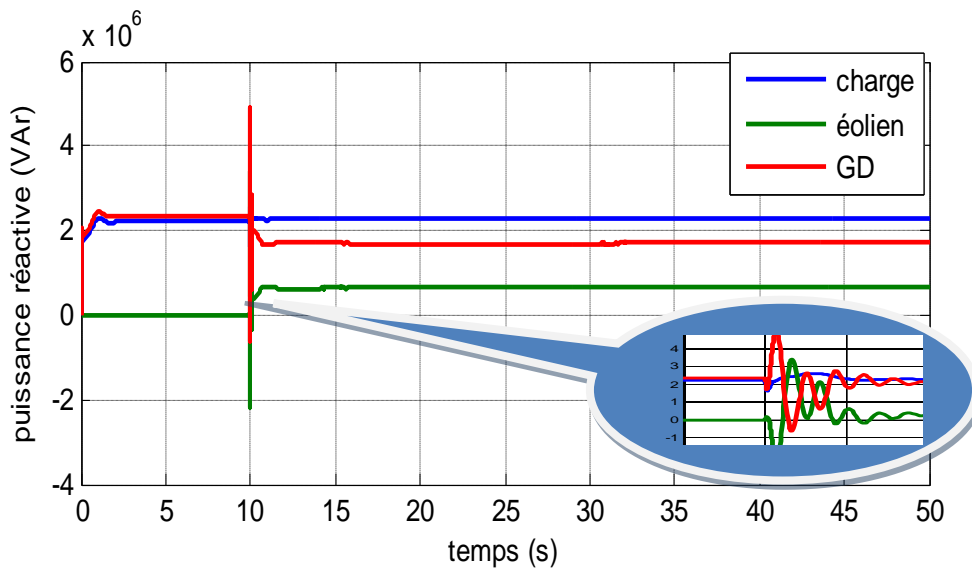


Figure III-26 : La puissance réactive

Dans la période [0s, 10s] il y a :

- L'éolien est arrêté et le diesel est fourni seul la puissance réactive à la charge.

Dans le temps 10 s il y a :

- La puissance réactive de la charge est stable.
- L'éolienne consomme une énergie réactive
- Le groupe diesel fourni de l'énergie réactive à la charge et l'éolienne.

Dans la période [10 s, 50 s] :

- La puissance réactive de la charge est stable à 2.4 MW .
- La puissance réactive de la groupe diesel est stable à 1.8 MW .
- La puissance réactive de l'éolienne est stable à 0.6 MW .

Etude de la fréquence figure III-27 :

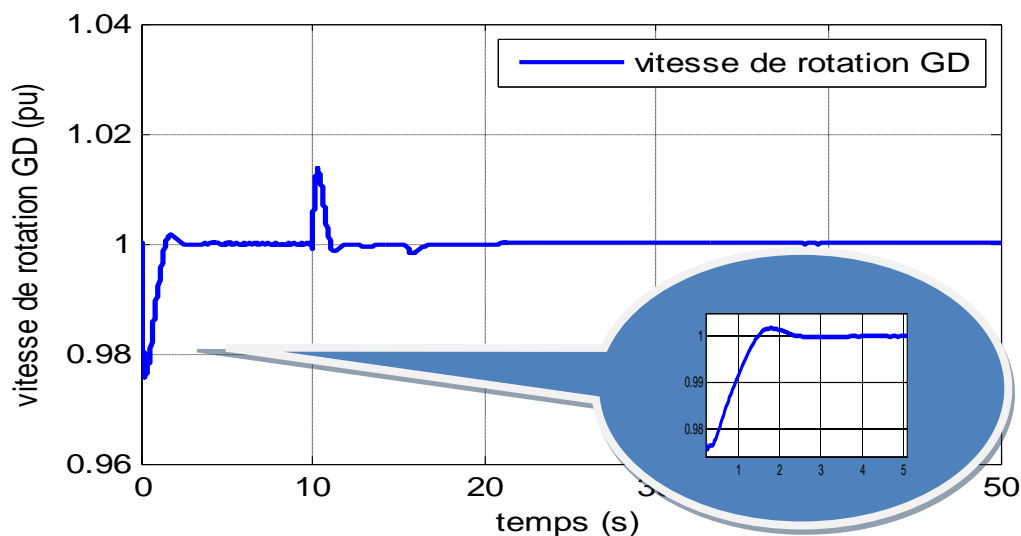


Figure III-27 : La vitesse de rotation du GD

Nous avons appliqué à notre réseaux un démarrage d'éolien dans le temps 10s

Dans la période [0s, 0.4s] :

- Une chute de la vitesse de groupe diesel (c'est à dire une chute dans la fréquence).

Dans le temps 0.4 s :

- Une augmentation de la vitesse de groupe diesel (c'est à dire une augmentation dans la fréquence) parce que il ya un démarrage de groupe diesel.

Dans la période [0.4 s, 10 s]:

- Une stabilisation de la vitesse de groupe diesel (c'est à dire une stabilisation dans la fréquence).

Dans la période [10 s, 12 s] :

- la vitesse de groupe diesel est varié (c'est-à-dire la variation de la fréquence).

Dans le temps [12 s] :

- le retour la vitesse de groupe diesel de la valeur nécessaire (c'est-à-dire il retour la fréquence 50 Hz).

Dans la période [12 s, 50 s]:

- Une stabilisation de la vitesse de groupe diesel (c'est à dire une stabilisation dans la fréquence).

Etude de la tension figure III-28 :

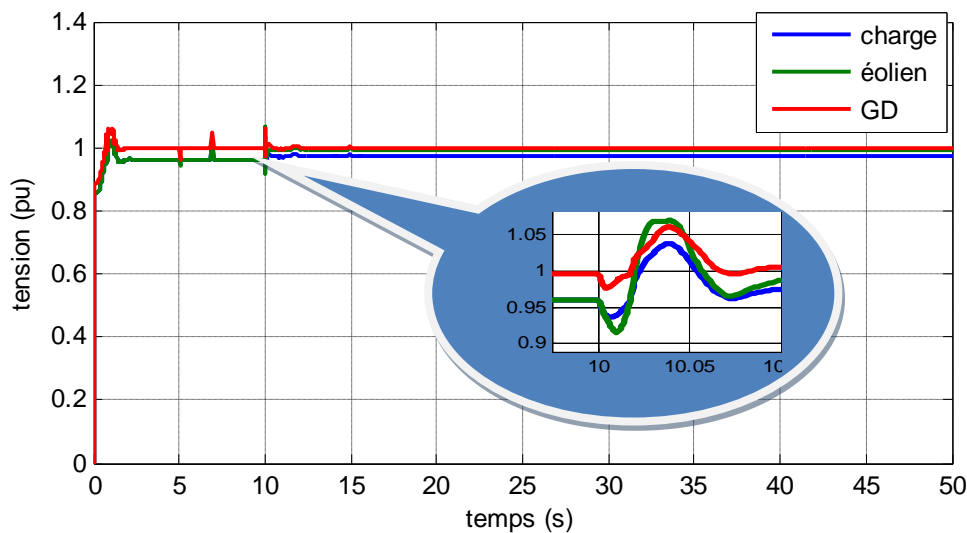


Figure III-28 : Les tensions

Dans la période [0s, 0.4s] :

- On remarque une augmentation de tension de groupe diesel à cause de démarrage de groupe diesel

Dans la période [0.4 s, 10s]:

- Une stabilisation de les tensions de groupe diesel et de l'éolien

Dans le temps [10s]:

- On remarque une petite variation dans les tensions à cause de démarrage l'éolien.

Dans la période [10 s, 50s]:

- Les tensions rotore un régime stable à cause de les régulateurs de tension dans l'éolien et le groupe diesel.

III-7 Conclusions:

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné un système hybride constitué par une éolienne, un groupe diesel et une charge. Cette dimensionnement est validé par le logiciel HOMER. Les sources d'énergie sont connectées sur un bus AC. Nous avons réalisés sous l'environnement MATLAB/Simulink une simulation de système complet pour permettre l'étude de comportement et l'analyse dynamique de ce système.

Les résultats obtenus indiquent que l'intégration d'une éolienne sur un réseau isolé augmente la capacité et la stabilité du réseau. L'augmentation de capacité du réseau est illustré par l'augmentation de réserve tournant de groupe diesel dans le cas au l »éolienne fonctionne et l'augmentation de stabilité est réalisé par la performance de MADA d'injecté de puissance réactive au réseau.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire, a permis de développer et d'étudier l'intégration d'une éolienne sur un réseau autonome.

- Nous avons présenté dans le premier chapitre une description générale des systèmes autonomes et système hybrides. Tous les composants ont été introduits afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des ces systèmes. Afin de faciliter la conception, nous avons aussi mis en valeur les avantages, les inconvénients et les limites d'utilisation de ces systèmes.

- Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la machine éolienne, en donnant les généralités sur son évolution, son utilisation, les deux grandes familles des aérogénérateurs, les différents composants d'une éolienne à axe horizontale et ses domaines d'applications. Dans une deuxième partie, les différentes caractéristiques de l'énergie renouvelable (éolienne) ont été présentées en définissant plusieurs.

- Dans le troisième chapitre, nous avons dimensionné un système hybride constitué par une éolienne, un groupe diesel et une charge. Ce dimensionnement a été validé par le logiciel HOMER. Les sources d'énergie sont connectées sur un bus AC. Nous avons réalisés sous l'environnement MATLAB/Simulink une simulation de système complet pour permettre l'étude de comportement et l'analyse dynamique de ce système.

Les résultats obtenus indiquent que l'intégration d'une éolienne sur un réseau électrique isolé augmente la capacité et la stabilité du réseau :

- L'augmentation de la capacité du réseau est dépend de l'augmentation de réserve tournant de groupe diesel dans le cas au l'éolienne fonctionne
- L'augmentation de la stabilité est réalisée par la performance de MADA qui injecte de la puissance réactive dans le réseau.

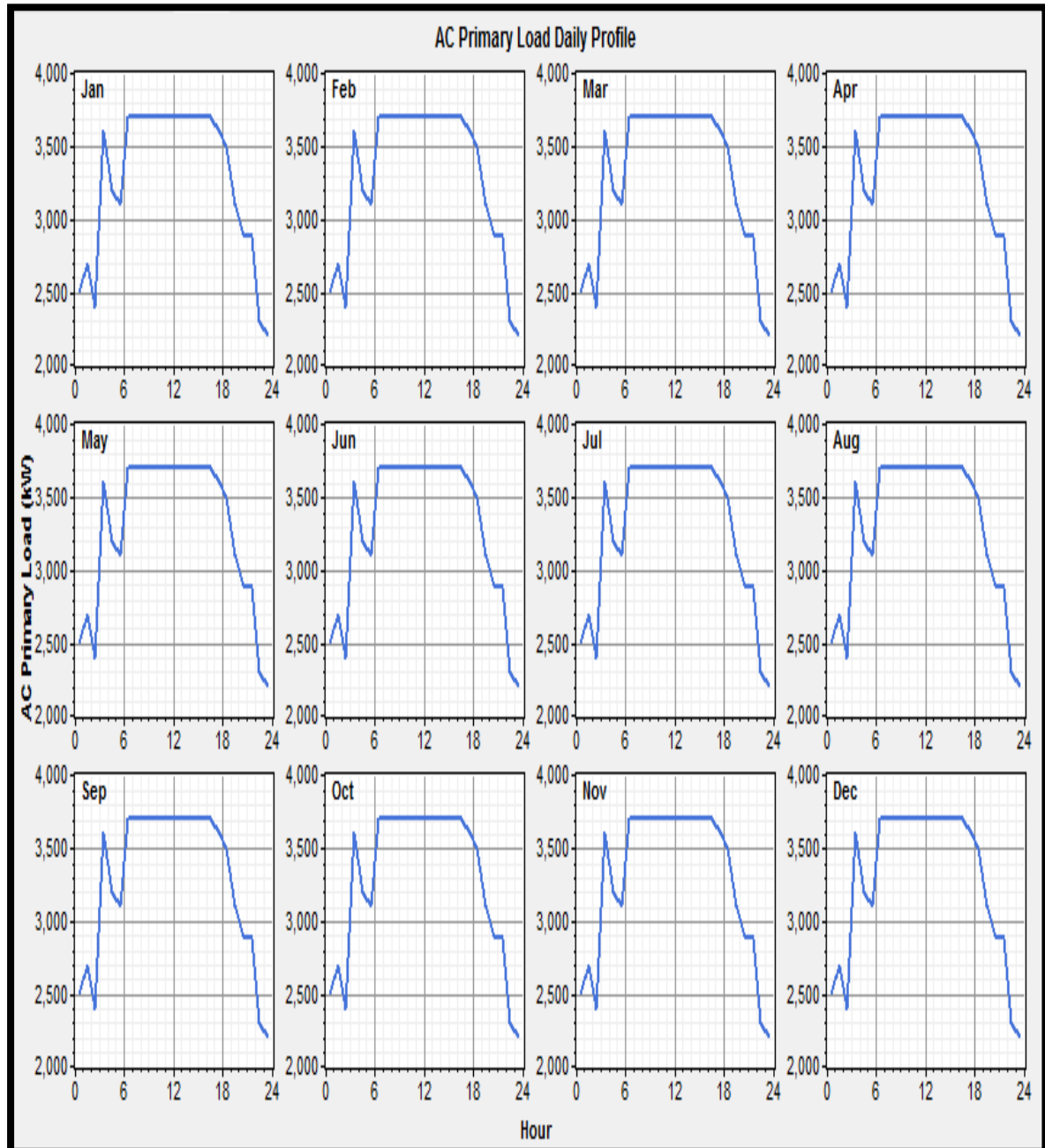
Bibliographie

- [1] Giuseppe Saccomando, I S., et Ambra Sannino, "Improving Voltage Disturbance Rejection for Variable-Speed Wind Turbines." IEEE Transactions on energy conversion, Volume 17, Issue 3, Page(s) : 422 - 428, Sept. 2002.
- [2] J. T. Bialasiewicz, E. Muljadi, S. Droui1het, G. Nix "Modular Simulation of a Hybrid Power System with Diesel and Wind Turbine Generation" Windpower, Bakersfield, CA April 27-May 1, 1998.
- [3] R. W. Wies et A. N. Agrawa1, "Integration of Wind-Turbine Generators (WTGs) into Hybrid Distributed Generation Systems in Extreme Northern Climates," Proceedings of the 2003 International Yukon Wind Energy Conference: Cold Climate Opportunities, 2003.
- [4] R. Cardenas, R. Pena, G. Asher, I Clare, "Control strategies for enhanced power smoothing in wind energy systems using a flywheel driven by a vector-controlled induction machine", IEEE Transactions on industry electronics, Volume 48, Page(s) : 625-635, 2001.
- [5] "Association canadienne de l'énergie éolienne", <http://www.smallwindenergy.ca>
- [6] Baghdaai Fazia, "Modélisation et Simulation des Performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables", Mémoire de Magister de université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou dans 26 /09/211.
- [7] Ionel Vechiu, "Modélisation analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome", Mémoire de Docteur de l'université du Havre dans 15 décembre 2005.
- [8] www.actu-environnement.com, [//fr.ekopedia.org](http://fr.ekopedia.org), [//fr. Wikipedia.org](http://fr.Wikipedia.org)

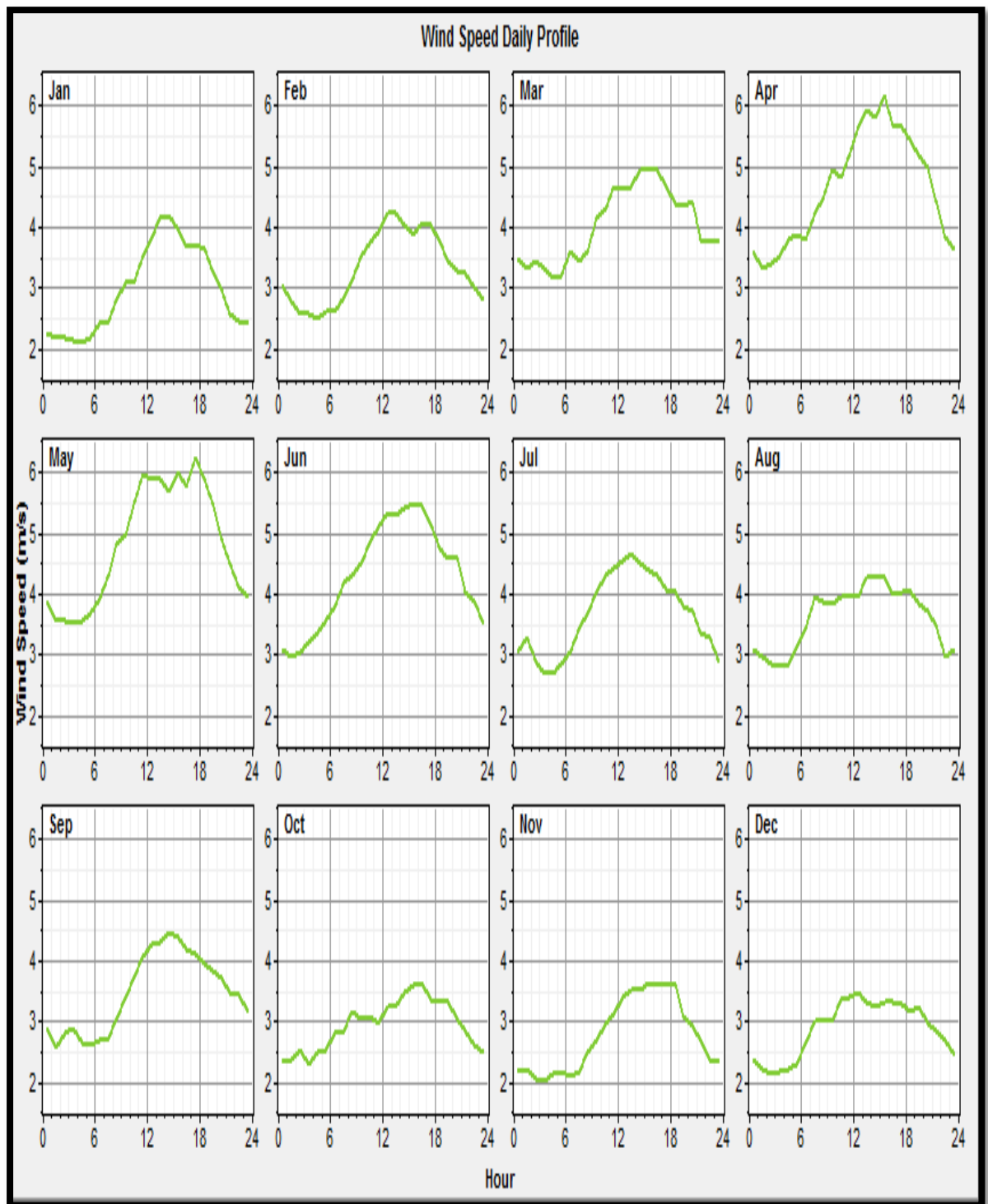
- [9] M. BOUDIA Sidi Mohammed, “Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie”, Mémoire de Doctorat de Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd dans 2011.
- [10] CHERFIA NAÏM, “Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens”, Mémoire de ingénieur de Université Mentouri Constantine, Algérie dans 07/ 06 / 2010.
- [11] Ackermann, T. (2005). Wind Power in Power Systems, John Wiley&Sons, England.
- [12] MOUSSA SIDDO Abdoulaziz, “Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne”, Mémoire de ingénieur de Ecole Nationale Polytechnique dans 2007.

Annexe

1. Profil de charge quotidienne :



2. Profil de vent quotidien :



3. Les paramètres de simulation :

3.1. Les paramètres de transformateur couplé à groupe diesel :

Block Parameters: 30 kV/ 400 V 5 MVA

Click the Apply or the OK button after a change to the units pop conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Units

Nominal power and frequency [Pn(VA) , fn(Hz)]
[5e6 50]

Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu)]
[30e3 , 0.025/30 , 0.025]

Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu)]
[400, 0.025/30 , 0.025]

Magnetization resistance Rm (pu)
500

Magnetization reactance Lm (pu)
inf

Saturation characteristic [i1 , phi1 ; i2 , phi2 ; ...] (pu)
[0,0 ; 0.0024,1.2 ; 1.0,1.52]

Initial fluxes [phi0A , phi0B , phi0C] (pu):
[0.8 , -0.8 , 0.7]

3.2. Les paramètres de transformateur couplé à l'éolien :

Block Parameters: 30 kV/ 575 V 2 MVA

Click the Apply or the OK button after a change to the units p conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Units

Nominal power and frequency [Pn(VA) , fn(Hz)]
[2e6 50]

Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu)]
[30e3 , 0.025/30 , 0.025]

Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu)]
[575, 0.025/30 , 0.025]

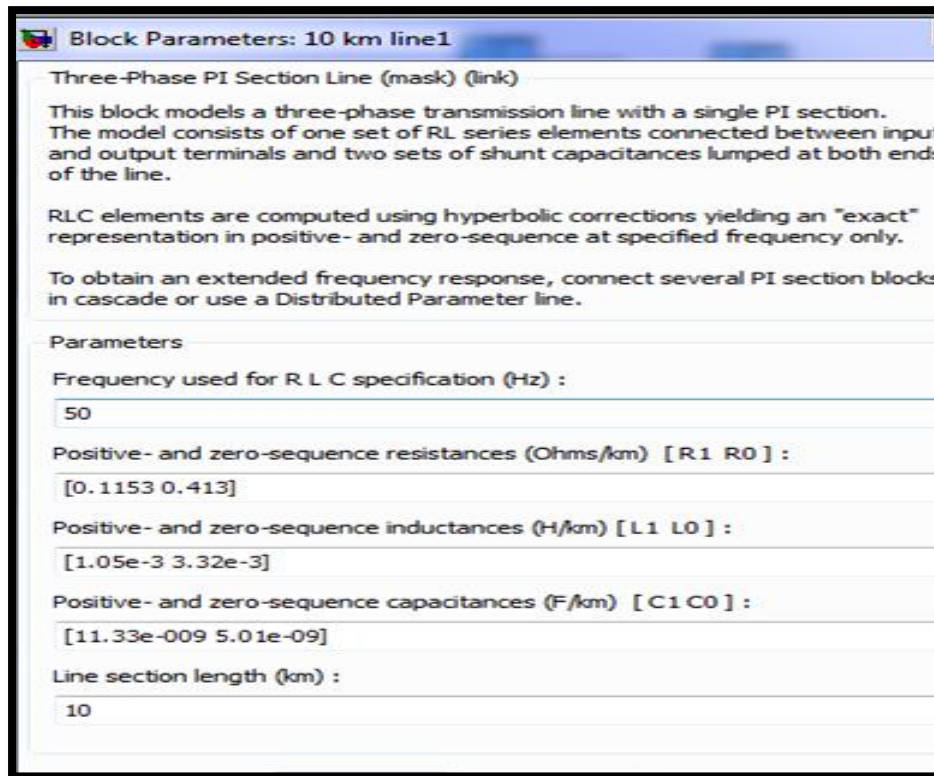
Magnetization resistance Rm (pu)
500

Magnetization reactance Lm (pu)
inf

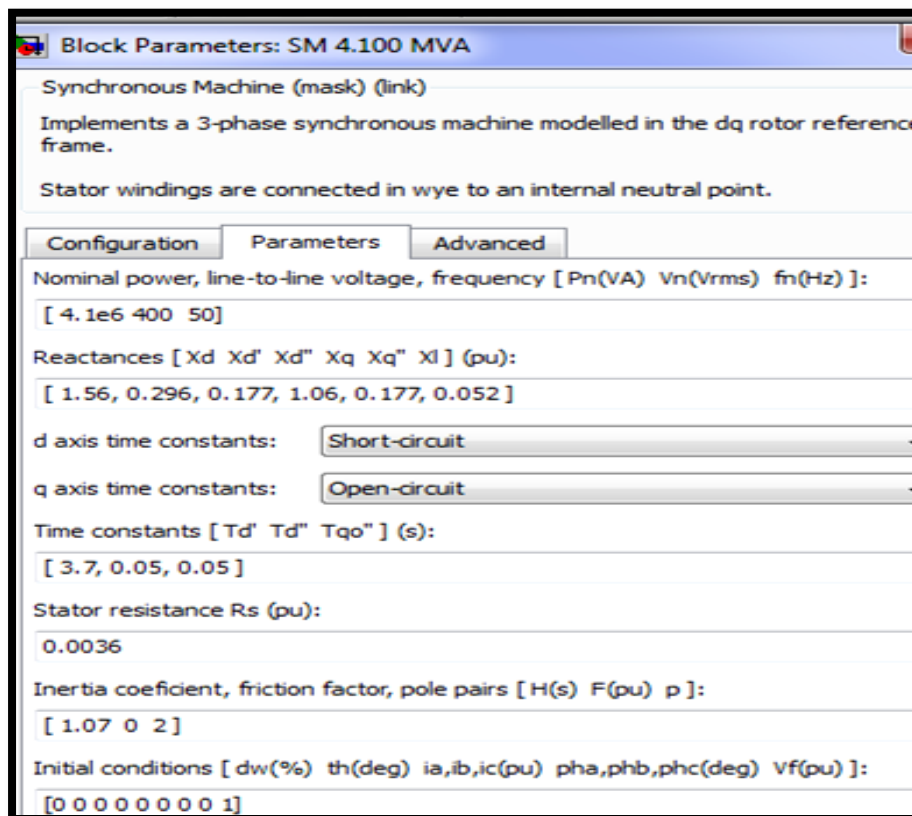
Saturation characteristic [i1 , phi1 ; i2 , phi2 ; ...] (pu)
[0,0 ; 0.0024,1.2 ; 1.0,1.52]

Initial fluxes [phi0A , phi0B , phi0C] (pu):
[0.8 , -0.8 , 0.7]

3.3. Les paramètres de line :



3.4. Les paramètres de Générateur Synchrone de groupe diesel :



ملخص

في الوقت الحاضر يعتبر مولد الديزال التقنية الأكثر استعمالا في تزويد المناطق المعزولة من التيار الكهربائي فالوصول الى هذه المناطق صعب و مكلف من الناحية الصيانة و التزويد بالديزال , و لذلك قمنا بدمج في نظام هجين مولد ديزال مع مصدر لطاقة المتجددة (تربينات الرياح) الذي يمثل نظام الامثل اقتصاديا.

الدراسة التي قمنا بها تتمثل في تزويد منطقة سكنية تقع في الجزائر في بادئ الامر تحدثنا حول النظام الهجين و مكوناته وكذلك قمنا بتحديد ابعاد النظام الهجين الذي يتكون من مولد الديزال و تربينات الرياح و الحمل الكهربائي و بعدها قمنا بالتحقق من هذه الابعاد بواسطة البرنامج HOMER.

في النهاية قمنا بمحاكاة هذا النظام بواسطة برنامج MATLAB/Simulink. النتائج المتحصل عليها تثبت ان دمج تربينات الرياح في شبكة كهربائية معزولة ترفع من السعة و الاستقرار النظام.

الكلمات الرئيسية : تربينات الرياح , مولد الديزال , نظام هجين , الحمل الكهربائي , الابعاد.

Résumé

Actuellement, Le générateur diesel est la technique la plus utilisée pour l'électrification des sites isolés. Néanmoins, l'accès à ces sites étant généralement long et difficile, les coûts de maintenance et d'approvisionnement en carburant sont très élevés. En conséquence, nous avons envisagé de coupler – au sein d'un système hybride - un générateur diesel avec source d'énergie renouvelable (éolienne) qui représente alors souvent l'option la plus économique.

Cependant, notre étude porte sur l'alimentation d'une habitation, qui peut être située sur un site Algériens. Dans un premier temps, nous parlons sur les composantes du système hybride, puis sur l'ensemble de ce système. Ainsi, nous avons dimensionné un système qui comporte un groupe diesel, une éolienne et une charge, ce dimensionnement est validé par le logiciel HOMER. Finalement, nous avons simulés ce système dans l'environnement MATLAB /Simulink. Les résultats obtenus indiquent que l'intégration d'une éolienne dans un réseau isolé augmente la capacité et la stabilité du système..

Mots-clés : éolien, générateur diesel, système hybride, réseau isolé. HOMER

Abstract

Currently, the diesel generator is the most used technique for the electrification of isolated sites. Nevertheless, access to these sites being generally long and difficult, the costs of maintenance and fuel supply is very high. Consequently, we planned to couple - within a hybrid system - a diesel generator with renewable source of energy (wind) which then represents often the most economic option.

However, our study concerns the supply of a city, which can be located on an Algerian site, by the hybrid system. Initially, we speak on the components about the hybrid system, then on the whole of this system. Thus, we dimensioned a system which comprises a diesel group, a wind-engine and a load, this dimensioning is validated by software HOMER. Finally, we simulated this system in environment MATLAB /Simulink. The results obtained indicate that the integration of a wind-engine in an isolated network increases the capacity and system stability.

Keywords: wind system, diesel system, hybrid system, the load, and sizing.