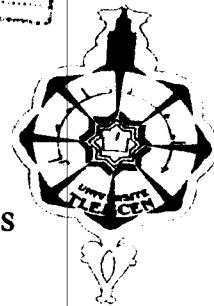




Inscrit Sous le N°:
 Date le: 28/10/2009
 Code: 3741

Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen
 Faculté des Sciences
 Département de Physique
 Unité De Recherches des Matériaux et Energies Renouvelables



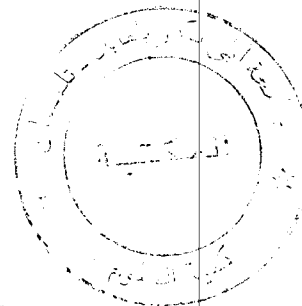
Mémoire de Magister

Option : Physique Energétique et Matériaux

Par

LAZAAR Sajja

Sur le Thème



CONTRIBUTION A L'ETUDE D'UNE STATION EOLIENNE POUR LA PRODUCTION DE L'ELECTRICITE. APPLICATION AUX SITES DE TLEMCCEN, DJELFA ET GHARDAÏA

Avril 2009
 Devant le jury d'examen

Président :

N. E. CHABANE SARI

Professeur

Université Abou-Bakar Belkaid de Tlemcen

Directeur du Mémoire

Ali Cheknane

Maître de Conférences

Université de LAGHOUAT

Co-directeur

B. Benyoucef

Professeur

Université Abou-Bakar Belkaid de Tlemcen

Examineurs

T. Benouaz

Professeur

Université Abou-Bakar Belkaid de Tlemcen

A. Chermiti

Maître de Conférences

Université Abou-Bakar Belkaid de Tlemcen

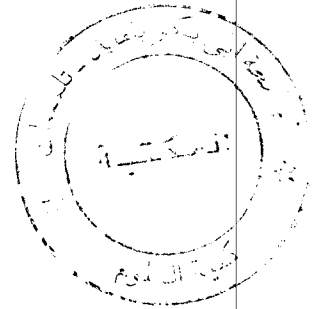
Invité

B. Yacoubi

Chargé de cours

Université Abou-Bakar Belkaid de Tlemcen

REMERCIEMENTS



REMERCIEMENTS

*Je voudrais remercier tout particulièrement **Mademoiselle A.SANOUDI** (Chargé de cours à l'Université de Tlemcen) de son aide et ses conseils précieux.*

*Mes sincères remerciements vont aussi à , **Monsieur A.BEBOUCHE** (Chercheur à l'unité de recherche de Ghardaïa), **Madame A.CHOUKCHOU** (Chargé de cours à l'Université de Tlemcen), **L.MERAD** (Chargé de cours l'Université de Mascara), **Madame Z.DIB** (Chargé de cours à l'Université de Tlemcen).*

*Je remercie aussi **M^{elle} Malika DERGAL**, **M^{me} Sifia BELGHARESS**, **M^{elle} Amel BOUTASTA**, **M^{elle} Souad BOUSALEM**, **Mme Salima DRIF** et **M^r Abdelghani MOUSSAUI**.*

Merci à toutes les personnes que je n'ai pas citées et qui ont de près ou de loin participer à la réalisation de ce travail. Merci pour leur sympathie et simplement pour le plaisir que j'ai eu à les côtoyer quotidiennement.

DEDICACES

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

Notations utilisées dans le chapitre

Introduction	1
1-1-Situation de l'éolien dans le contexte des énergies renouvelables	1
1-2-Génération d'énergie renouvelable	3
1-2-1- Génération de la chaleur	4
1-2-1-1-Thermo solaire	4
1-2-1-2- Géothermie	5
1-2-1-3- Biomasse	6
1-2-2- Génération d'électricité	7
1-2-2-1- Photovoltaïque	7
1-2-2-2- Hydraulique	7
1-2-2-3- Energie de la mer	8
1-2-2-4-Production éolienne	8
1-3-Contexte historique	9
1-4-Notions théoriques sur l'éolien (théorème de Betz)	11
1-5-Types de turbines	14
1-5-1-Axe vertical	14
1-5-2-Axe horizontal	15
1-6- Constitution d'une éolienne	16
1-6-1- Principe	16
1-6-2- Constitution	17
1-6-3-Bilan des forces sur une pale	19
1-7- Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	20
1-8- Intérêt de la vitesse variable	21
1-9- Chaînes de conversion électrique	22
1-9-1 Systèmes couplés au réseau alternatif	22
1-9-2 Systèmes en site isolé	26
1-9-3 Systèmes couplés à des batteries électrochimiques ou à un bus continu	27
1-10- Avantages et désavantages de l'énergie éolienne	28
1-10-1- Les atouts	28

Sommaire

1-10-2- Les désavantages	30
Bibliographie	31

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

Notations utilisées dans le chapitre

Introduction	33
2-1- Critères de choix des sites éoliens	33
2-2- Origine du vent	35
2-3 Mesures du vent	36
2-3-1- Indicateurs écologiques	36
2-3-2- Anémomètres	37
2-4- Variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude	38
2-5- La puissance disponible	39
2-6- Modèles d'ajustement	39
2-6-1- Distribution de Weibull	40
2-6-2- Distribution hybride de Weibull	43
2-6-3- Distribution de Rayleigh	44
2-7- Facteur de puissance et indice de variation	44
2-8- Puissance moyenne annuelle fournie par un aérogénérateur	45
2-9- Gisement éolien en Algérie	45
2-10- Modélisation d'une turbine éolienne	47
2-11- Résultats et interprétation	49
CONCLUSION	54
Bibliographie	56

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

Notations utilisées dans le chapitre

Introduction	57
3-1- Pour quoi choisissant le moteur à courant continu	57
3-2- Définition de moteur à courant continu	57
3-2-1- Constitution d'un moteur à courant continu	58
3-2-2- Principe de fonctionnement	58
3-3 - Modèle théorique de la machine à courant continu	59
3-4 - Modèle théorique du système mécanique multi-masses	60

Sommaire

3-5- Outils de simulation MATLAB/SIMULINK	62
3-5-1- Matlab	62
3-5-2- Simulink	63
3-6 - Données numériques d'un entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu	64
3-7-Simulation du modèle de l'entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu sous Matlab-Simulink	65
3-8-Modèle théorique de la turbine à vent	67
3-9- Description et données numériques d'un modèle 2-masses d'une éolienne à base de la génératrice à courant continu	69
3-10 - Simulation du système de l'éolienne à base de la génératrice à courant continu sous Matlab-Simulink	71
Conclusion	80
Bibliographie	82
CONCLUSION GENERALE	
ANNEXES	

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins planétaires en énergie électrique considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Sans oublier que des événements climatiques récents, comme la canicule de l'été 2003 en France, ont soulevé de nouvelles interrogations sur la viabilité du nucléaire, notamment à cause du réchauffement local de la température de l'eau des fleuves utilisée pour refroidir les réacteurs.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, certains pays, se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables" faisant appel, de façon directe ou indirecte, à l'énergie solaire. Parmi celles-ci, l'éolien apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire. En effet l'énergie potentielle de masse d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable.

Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 12 GW, l'Espagne, numéro deux de l'Union Européenne avec 4,15 GW et le Danemark avec 2,9 GW à la fin de l'année 2002. Face à ces trois "poids lourds", la France ne représente que 230 MW éoliens.

Introduction générale

En ce qui concerne l'Algérie, le maximum est enregistré dans la région sud ouest du Sahara. Il est situé dans la région d'In Salah où la densité de puissance moyenne récupérable sur une année atteint les 2.1 MWh/m² an.

En effet, la majorité du sud ouest du Sahara est caractérisée par un potentiel annuel moyen récupérable variant de 1 à 2 MWh/m².

Des microclimats à l'ouest, dans les hauts plateaux possèdent des potentiels allant jusqu'à 1.4 MWh/m². Enfin, les valeurs estimées pour les régions de Batna, Biskra, El Bayadh, El Kheiter, Msila, El Oued et Ghardaïa ne doivent pas être négligées puisque leur potentiel respectif avoisine le 1MWh/m².

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type à courant continu dans un système éolien.

Le premier chapitre est consacré à donner quelques généralités sur les énergies renouvelables, tel que l'énergie solaire, hydraulique, éolienne..... et des rappels sur les systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées.

Dans **le deuxième chapitre** on présentera les modèles statistiques du vent tel que le modèle de Weibull ; aussi on s'intéresse à l'étude du gisement éolien des trois sites qui sont à la base de notre étude, à savoir : Tlemcen, Djelfa et Ghardaïa.

La modélisation énergétique complète du système est établie dans **le troisième chapitre**, ce dernier consiste à coupler une éolienne avec une machine à courant continu ; une simulation du système aérogénérateur/machine à courant continu sera présentée avec soin en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK. Cette simulation consiste à visualiser les variations du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ pour les trois sites envisagés.

CHAPITRE 1

*Généralités sur les systèmes
éoliens*

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

Notations utilisées dans le chapitre

Introduction

1-1-Situation de l'éolien dans le contexte des énergies renouvelables

1-2-Génération d'énergie renouvelable

1-2-1- Génération de la chaleur

1-2-1-1-Thermo solaire

1-2-1-2- Géothermie

1-2-1-3- Biomasse

1-2-2- Génération d'électricité

1-2-2-1- Photovoltaïque

1-2-2-2- Hydraulique

1-2-2-3- Energie de la mer

1-2-2-4-Production éolienne

1-3-Contexte historique

1-4-Notions théoriques sur l'éolien (théorème de Betz)

1-5-Types de turbines

1-5-1-Axe vertical

1-5-2-Axe horizontal

1-6- Constitution d'une éolienne

1-6-1- Principe

1-6-2- Constitution

1-6-3-Bilan des forces sur une pale

1-7- Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

1-8- Intérêt de la vitesse variable

1-9- Chaînes de conversion électrique

1-9-1 Systèmes couplés au réseau alternatif

1-9-2 Systèmes en site isolé

1-9-3 Systèmes couplés à des batteries électrochimiques ou à un bus continu

1-10- Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

1-10-1- Les atouts

1-10-2- Les désavantages

Bibliographie

1
1
3
4
4
5
6
7
7
7
8
8
9
11
14
14
15
16
16
17
19
20
21
22
22
26
27
28
28
30
31

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

Notations utilisées dans le chapitre 1

C_p :	Coefficient de puissance de l'éolienne	
i :	Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal	(-)
\vec{F}_{ax} :	Vecteur force représentant la poussée axiale sur une pale	(rad)
\vec{F}_{rot} :	Vecteur force représentant la poussée en direction de la rotation sur la pale	(N)
\vec{F}_{res} :	Résultante de \vec{F}_{ax} et \vec{F}_{rot}	(N)
m :	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s	(N)
MS :	Machine synchrone	(Kg)
MAS :	Machine asynchrone	
MLI :	Modulation de Largeur d'Impulsions	
P_n :	Puissance nominale de la turbine	
P :	Puissance captée par la turbine	(Watt)
P_m :	Puissance extraite par le rotor éolien	(Watt)
P_{mt} :	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé	(Watt)
S :	Surface balayée par le rotor de l'éolienne	(m ²)
\vec{V} :	Vecteur vitesse du vent	(ms ⁻¹)
V_1, V_2 :	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne	(ms ⁻¹)
\vec{V}_{rot} :	Composante de la vitesse du vent due à la rotation de la turbine	(ms ⁻¹)
\vec{V}_{res} :	Résultante des vecteurs \vec{V} et \vec{V}_{rot}	(ms ⁻¹)
V_d :	Vitesse de démarrage	(ms ⁻¹)
V_n :	Vitesse nominale	(ms ⁻¹)
V_c :	Vitesse de coupure	(ms ⁻¹)
ρ :	Densité de l'air (1,225)	(kg.m ³)

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

λ :	Vitesse spécifique de l'éolienne	(-)
λ_{opt} :	Valeur optimale de λ	(-)
Ω :	Vitesse de rotation de la turbine	(rads ⁻¹)
β :	Angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal	(°)

Introduction :

L'utilisation des systèmes éoliens pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans un site isolé assez bien venté. De tel système présente plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité.

Deux types de système éolien existent : le système à axe horizontale et à axe verticale.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents composants d'un aérogénérateur ainsi que son principe de fonctionnement.

1-1- Situation de l'éolien dans le contexte des énergies renouvelables : [1]

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. En effet, la consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître (Figure 1-1) (données 2000 selon [2], [3]) posant des questions cruciales sur l'effet de serre et l'amenuisement des ressources énergétiques.

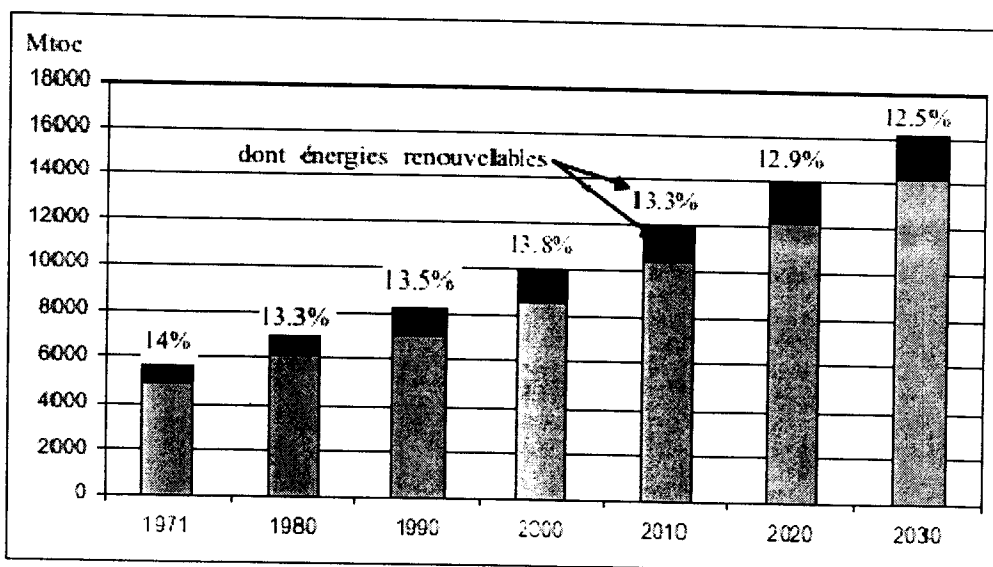


Figure 1-1 Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions.

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La figure (1-2) montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre, qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs. [4]

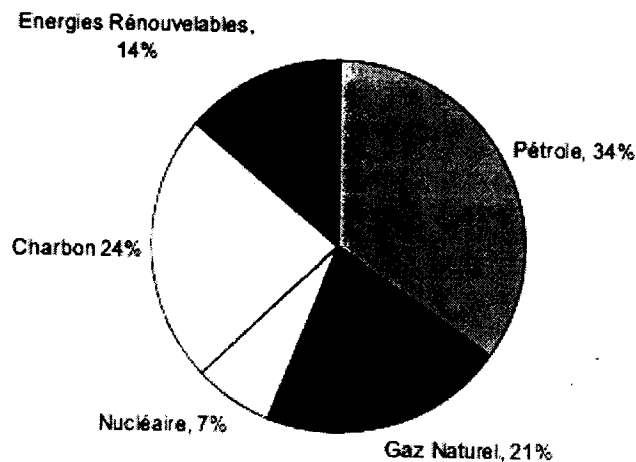


Figure 1-2 Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde

L'autre argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité des ressources en énergies. Dans le courant de 21^{ème} siècle, le paysage énergétique va radicalement changer car plusieurs ressources fossiles risquent de disparaître.

De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour « tenter » de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres. Dans le contexte économique actuel où l'on ne chiffre qu'une partie des coûts en occultant certains « coûts collatéraux » (démantèlement de centrales, pollution,...) les installations à énergie renouvelable peuvent encore aujourd'hui avoir un coût important (exemple des panneaux solaires photovoltaïques) et sont donc plutôt

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

réservées à des pays développés où elles peuvent dans d'autres cas être assez peu onéreuses (exemple de la combustion de la biomasse) et peuvent être utilisées dans les pays en voie de développement.

1-2- Génération d'énergie renouvelable :

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est lié au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium qui est extrait des gisements respectifs et acheminé « sans gros problèmes » vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être éloignées de milliers de kilomètres. Par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation.

Seule la biomasse semble avoir les propriétés les moins restrictives. Par exemple un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés, les panneaux solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées, les propriétés de la houle ne sont pas favorables partout sur les mers. Dans les zones où le réseau existe, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire de transformer l'énergie renouvelable sous la forme électrique qui est transportable via les lignes électriques.

La production énergétique est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. Cependant, le caractère capricieux des sources renouvelables pose le problème de la disponibilité énergétique et du stockage de masse, actuellement principalement assuré par l'hydraulique.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique. A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de

la non régularité des ressources. A l'opposé, les fluctuations de demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire avec l'énergie éolienne. Le stockage de l'énergie électrique à grande échelle n'est pas pour le moment envisageable.

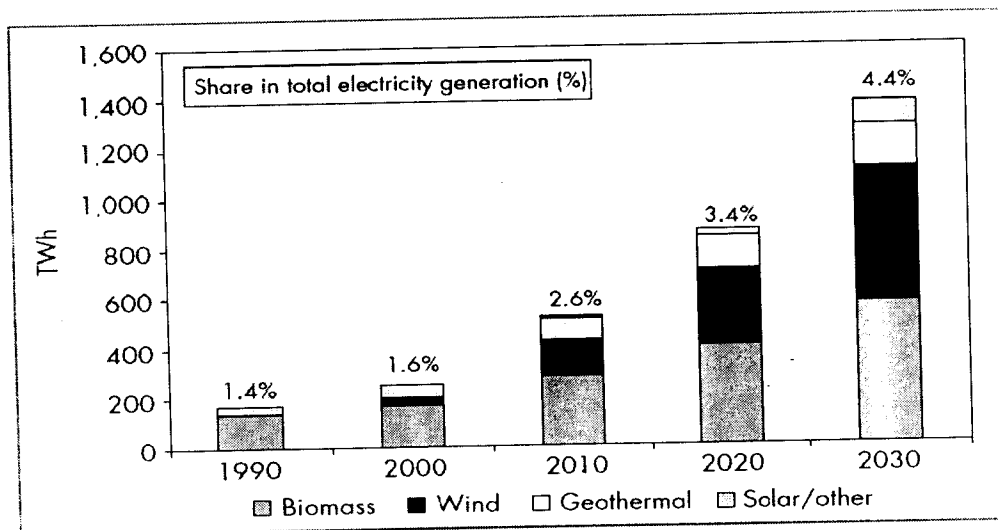


Figure 1-3 Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables [5]

1-2-1- Génération de la chaleur :

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole. Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables. Une description et quelques commentaires sont proposés ci-dessous.

1-2-1-1-Thermo solaire :

Une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermiques. Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C.

Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs est élevée. Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couverts de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation locale (principalement chauffage individuel, piscines). En 2003 environ 14000 m² de capteurs de ce type ont été en utilisation en Union Européenne avec une croissance annuelle de 22%.

Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau douce par distillation qui est très intéressante du point de vue des pays en voie de développement. La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent. [1]

1-2-1-2- Géothermie :

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. Partout, la température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3°C par 100m en moyenne jusqu'à 15°C ou même 30°C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1 000°C à 4 300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères.

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement : la haute (>180 °C), moyenne (>100 °C), basse (>30 °C) et très basse énergie. Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels... La géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans

le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas, très élevé.

1-2-1-3- Biomasse :

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Différents types sont à considérer : le bois – énergie, les biocarburants, le biogaz.

Le bois – énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au monde. En Europe, c'est 51% de la part de l'énergie renouvelable qui appartient à ce mode de production d'énergie. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage. On peut utiliser toutes les ressources du bois : les chutes ou déchets de production des industries de transformation du bois (bois d'élagage, le bois forestier provenant de l'entretien des espaces boisés ou le bois de rebut provenant d'emballages, de palettes etc.). L'utilisation va de petites chaufferies individuelles jusqu'à la production de la chaleur industrielle de plus de 15 MW. Le développement *des biocarburants* est souvent corrélé aux cycles de variation des prix du baril de pétrole. Aujourd'hui éthanol (betterave, blé...) et biodiesel (colza, tournesol...) offrent des avantages environnementaux appréciables dans le contexte de la lutte contre l'effet de serre. L'Union européenne projette d'atteindre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport au million produit actuellement.

La principale motivation qui pousse à la production *du biogaz* est environnementale. La production de l'énergie, peut être vue seulement comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais elle représente une ressource renouvelable très importante. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré. Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution. Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. De nos jours la filière carburant ainsi que la génération de l'électricité est en pleine expansion. En 1993, 6 millions de m³ ont été utilisés dans le monde. 80% provenait des décharges d'ordure ménagères. [6] L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum : une croissance de cette technologie est donc à prévoir.

1-2-2- Génération d'électricité :

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique.

1-2-2-1- Photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Les panneaux solaires actuels sont relativement onéreux à la fabrication malgré la matière première peu coûteuse et abondante (silice) car une énergie significative est nécessaire à la production des cellules. Cependant, de nets progrès ont été faits à ce sujet et on considère aujourd'hui qu'il suffit de 3 à 5 ans pour qu'un panneau produise l'énergie que sa construction a nécessitée. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie utilisée. Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT). Cette dernière caractéristique est assez commune avec la production d'énergie éolienne.

Les panneaux solaires sont très pratiques d'utilisation. L'intégration dans le bâtiment est facile et devient même esthétique. Pour les sites isolés et dispersés qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale (télécommunication, balises maritimes, etc..).

La technique photovoltaïque malgré sa complexité est aussi en très forte croissance. En 2001, en Europe on comptait environ 250 MW installés et en 2003 ce chiffre est monté jusqu'au 560 MW de puissance installée.

1-2-2-2- Hydraulique :

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et « stockable ».

Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique. Certains pays sont déjà « saturés » en sites hydroélectriques exploitables et ne peuvent pratiquement plus progresser dans ce domaine. Les sites de petite puissance (inférieures à 10kW) sont des solutions très prisées dans les applications aux petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ces sites de production sont un grand avantage.

1-2-2-3- Energie de la mer :

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues sont créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique.

Une des plusieurs façons de la récupérer de l'énergie de la mer c'est la production grâce à la marée qui est due à l'action de la lune sur les eaux. Les barrages ou des hydroliennes installées dans les endroits fortement touchés par ce phénomène peuvent être une source de l'énergie substantielle comme c'est le cas de l'usine de la Rance ou bien celle d'Annapolis au Canada. L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées.

1-2-2-4 -Production éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an.

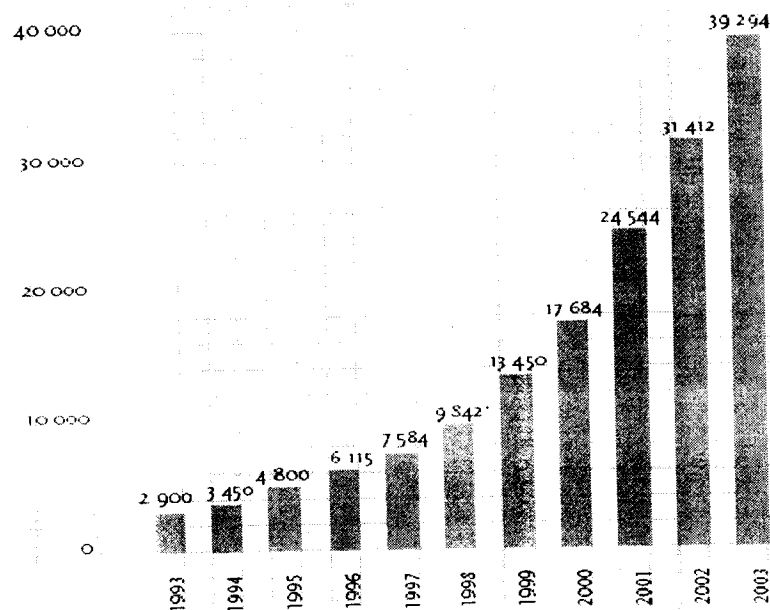


Figure 1-4 Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW [7]

1-3- Contexte historique :

Très tôt, dans l'histoire des techniques, le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique : pour la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ans Av. JC), pour les moulins (à céréales, olives), le pompage ou, au Moyen Age, pour l'industrie (forges...). La conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique est en effet relativement aisée, il faut « seulement » disposer d'un potentiel satisfaisant et résister aux caprices des vents excessifs. A part dans les régions plates, l'énergie hydraulique s'est ainsi souvent révélée plus intéressante, ce qui explique la situation actuelle où l'hydroélectricité est dominante parmi les sources renouvelables. En outre l'eau s'accumule facilement dans des réservoirs et permet de stocker de l'énergie. Vers le milieu du XIXème siècle, il y avait environ 200 000 moulins à vent en Europe, c'est principalement l'arrivée des machines à vapeur industrielles qui a initié leur déclin.

Ce n'est qu'à la fin du XIXème siècle, lorsque l'électricité pris son essor, que l'aérogénérateur électrique fit ses premiers pas. Au Danemark, Poule La Cour fut, sans doute, le pionnier, il a associé une turbine éolienne à une dynamo en 1891. En France, contrairement

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

à ce que la situation actuelle pourrait laisser penser, les recherches allèrent bon train dans les années 1920 (éolienne bipale de 20m de diamètre, compagnie CEM) puis dans les années 1950-60 (tripale de 30m et génératrice synchrone de 800 kW à Nogent le Roi, bipale de 35 m et génératrice asynchrone de 1 MW à Saint Rémy des Landes). En 1941, une éolienne bipale de 1250 kW (machine synchrone) était expérimentée aux USA dans le Vermont. En 1978, les Danois, aujourd'hui leaders dans le domaine, réalisèrent une machine tripale de 54m pour une puissance de 2 MW. Les nombreuses réalisations expérimentales (notamment en Californie) et leurs avatars permirent de perfectionner les turbines, les systèmes de freinage d'urgence, les pylônes et les divers dispositifs de contrôles et d'obtenir des aérogénérateurs viables et compétitifs à la fin du XXème siècle. Diverses solutions de turbines furent explorées, notamment celles à axe vertical connue sous le nom de Darrieus (leur inventeur), mais ne subsistent aujourd'hui pratiquement plus que des machines à axe horizontal à 2 ou 3 pales. [8]

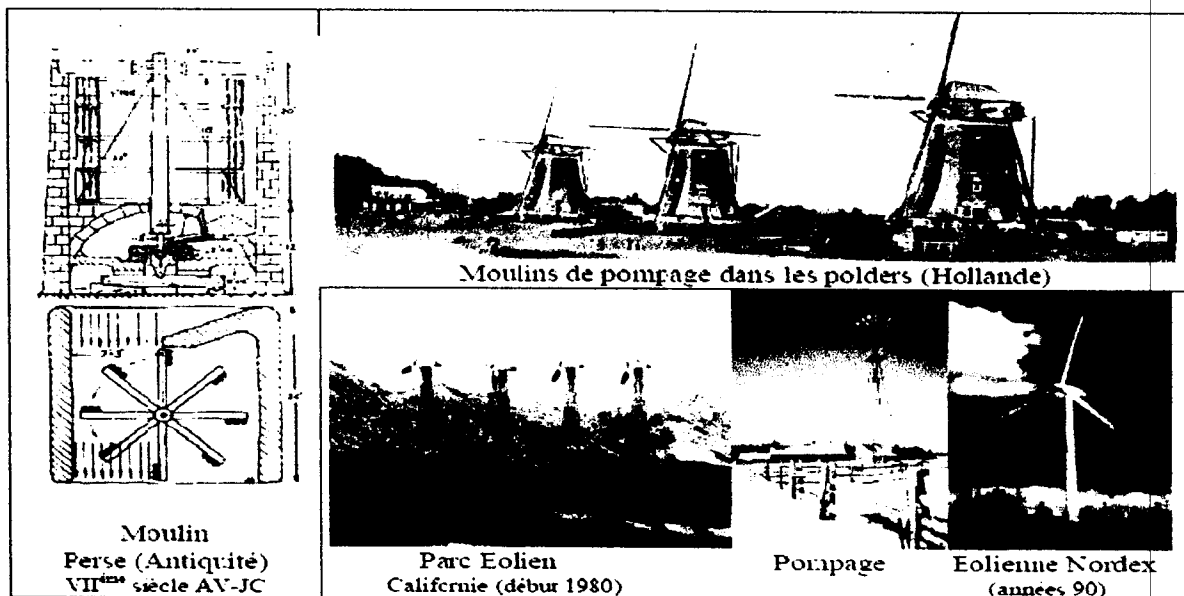


Figure 1-5 Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences, cette fois à plus grande échelle : l'expérience californienne a été la première à grande échelle (le « Wind-rush ») au début des années 80, notamment avec des turbines de moyenne puissance (55 kW) et grâce à une incitation fiscale très volontariste. On passa ainsi de 144 machines (pour un total de 7MW) en 1981, à 4687 machines (386 MW) en 1985. Mais c'est vers la fin

des années 1980 que le marché des systèmes raccordés au réseau a réellement décollés en Europe, dans le reste des USA et également en Asie et en Afrique du Nord. En Europe, les leaders furent les Danois, principalement à cause de leurs faibles ressources énergétiques classiques, aujourd'hui, ils conservent une très large avance au niveau mondial (plus de la moitié des systèmes éoliens vendus).

Dans les sites isolés, la rentabilité étant plus facile à obtenir, des petites éoliennes dans la gamme de quelques 100 W à quelques 10 kW sont commercialisées depuis plus longtemps.

La baisse des coûts des cellules photovoltaïques permet aujourd'hui de construire des systèmes hybrides éoliens et photovoltaïques qui profitent de la fréquente complémentarité vent-soleil (réduction des coûts des batteries de stockage nécessaires en site isolé).

1-4-Notions théoriques sur l'éolien (théorème de Betz) : [9]

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (1-6) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $(V_1 + V_2)/2$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

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

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

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

Soit en remplaçant m par son expression (1.1)

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1,3)$$

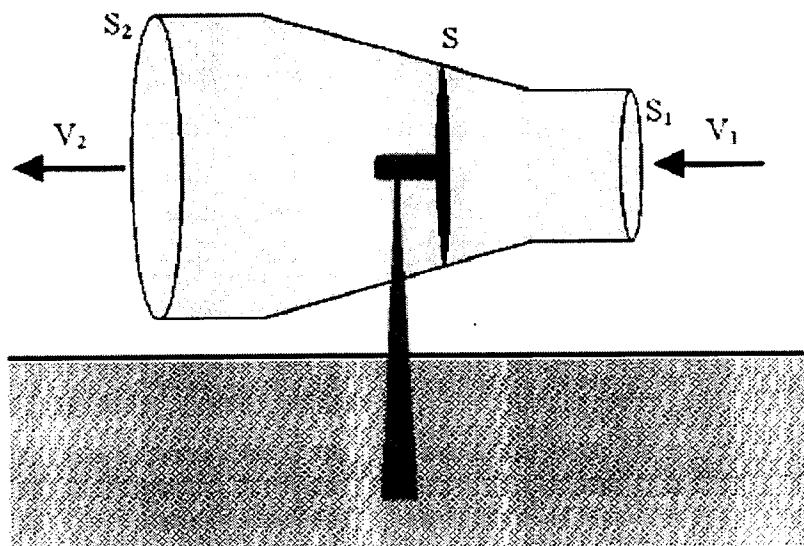


Figure 1-6 Tube de courant autour d'une éolienne

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1,4)$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1,5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (figure 1-7), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

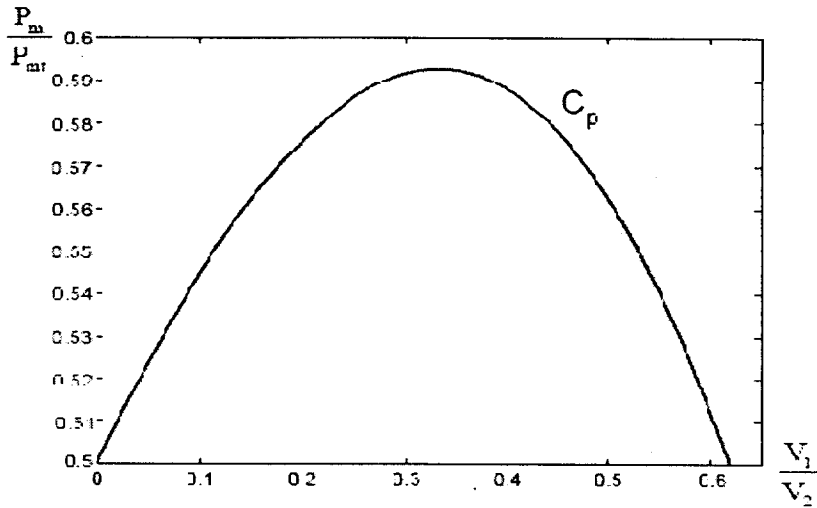


Figure 1-7 Coefficient de puissance

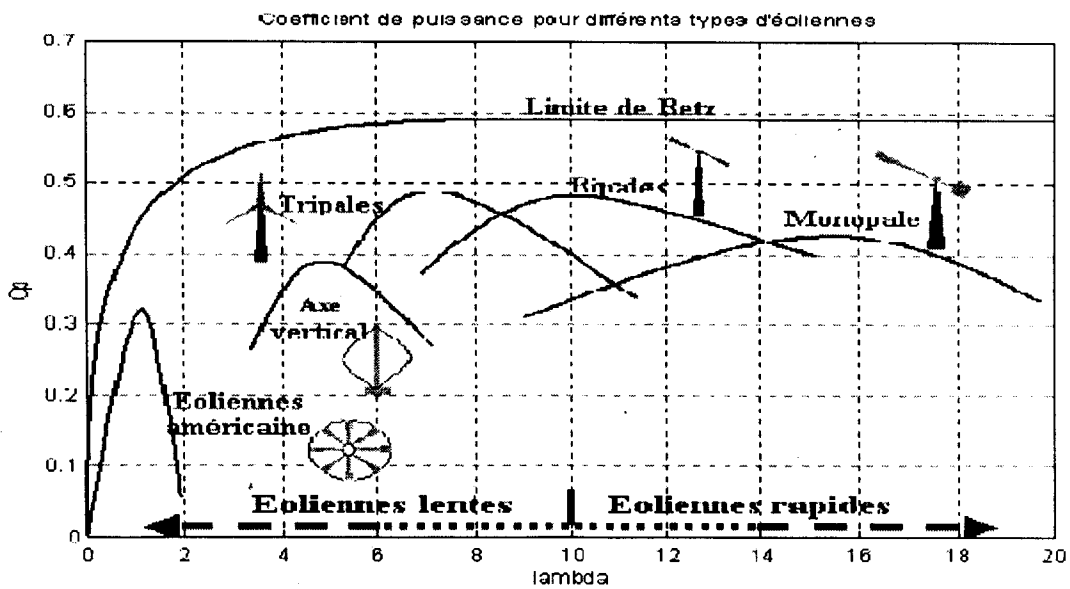


Figure 1-8 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. Leur coefficient de puissance (figure 1-8) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse

de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tri pales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure 1-8) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s. [10]

1-5-Types de turbines [8]

1-5-1- Axe vertical

Bien après les antiques moulins perses, plusieurs familles de technologies à axe vertical ont été imaginées et réalisées, mais, aujourd'hui, elles sont plutôt marginales. La figure (1-9) montre les principales technologies.

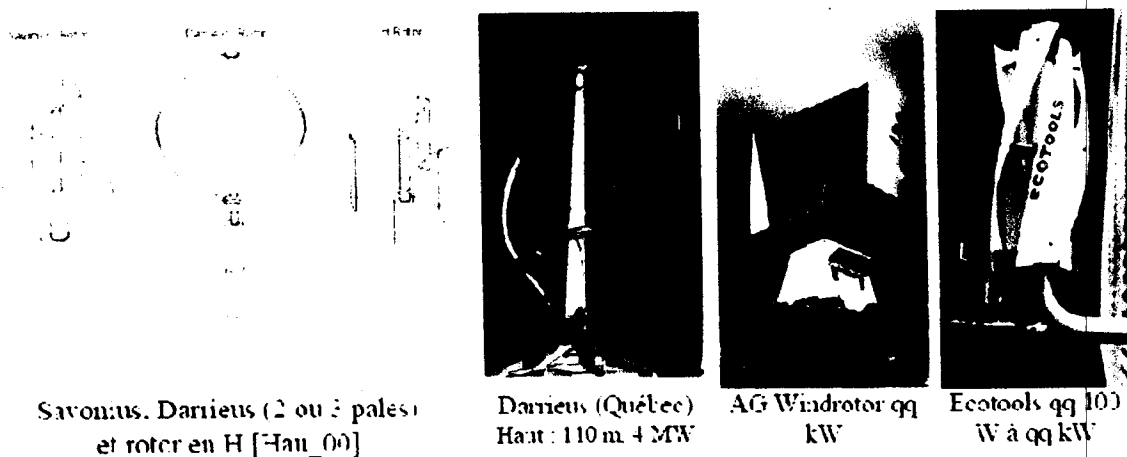


Figure 1-9 Technologie d'éoliennes à axe vertical

Avantages : machinerie au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, fort couple de démarrage, construction simple (Savonius), tourne à faible vitesse (donc peu bruyante).

Inconvénients : guidages mécaniques, notamment le palier bas qui doit supporter le poids de l'ensemble de la turbine. Parfois (technologie Darrieus) nécessite d'entraîner au démarrage (ce serait moins un problème aujourd'hui avec l'électronique de puissance déjà associée aux

systèmes à vitesse variable). Rendement aérodynamique inférieur aux axes horizontaux et courbes $C_p(\lambda)$ fortement en cloche nécessitant d'optimiser la vitesse de rotation par rapport à la vitesse du vent.

1-5-2- Axe horizontal [3]

La technologie largement dominante aujourd'hui est à axe horizontal à turbine tripale, parfois bipale et à rotor face au vent

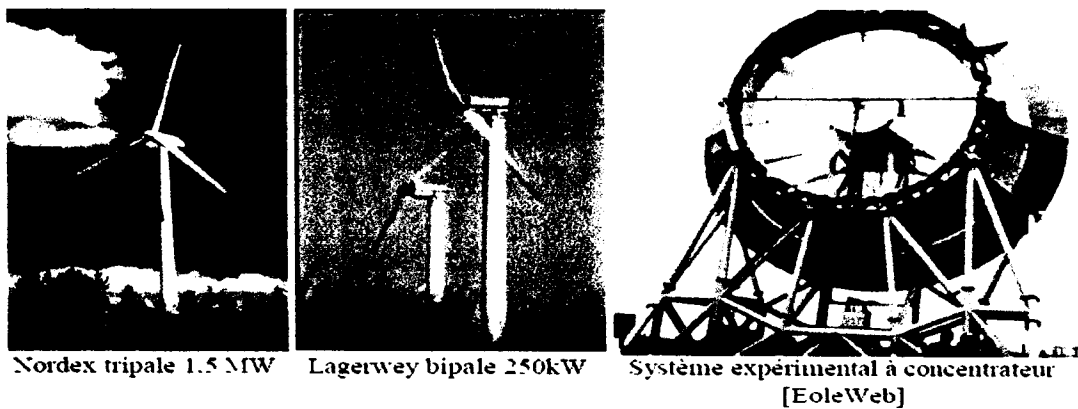
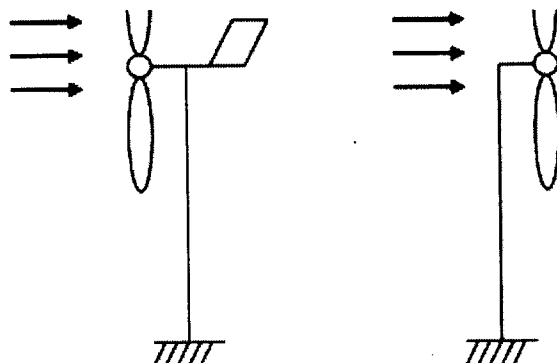


Figure 1-10 Technologie d'éoliennes à axe horizontale

Pour accroître la surface de captation, des dispositifs à concentrateur ont été réalisés mais, peut-être pour des raisons d'esthétique ou de résistance mécanique (le carénage est lourd), ils ne sont pas encore dans le domaine commercial, sauf celui de la société française CITA qui réalise une machine de 12 kW avec une turbine de 4,4 m de diamètre et un carénage de 5,3 m de diamètre. Les avantages de tels dispositifs sont une réduction du diamètre de la turbine ainsi que du bruit acoustique. Des grandes puissances sont envisagées, de l'ordre de 600 kW à plusieurs MW (notamment avec le constructeur Vortec mais également avec CITA), mais n'ont pas encore vu le jour.

La turbine peut se trouver à l'avant de la nacelle ou à l'arrière : au vent (upwind) ou sous le vent (downwind). L'avantage des dispositifs sous le vent est qu'ils se positionnent automatiquement face au vent ce qui permet, notamment pour les fortes puissances d'éviter le système mécanique d'orientation, complexe, lourd et coûteux. L'inconvénient majeur réside dans une fatigue accrue due aux fréquentes oscillations liées aux changements de direction du vent. Le procédé « sous le vent » reste peu utilisé comparativement à celui « au vent ».



Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

Le fonctionnement général est illustré par la figure (1-12). L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique.

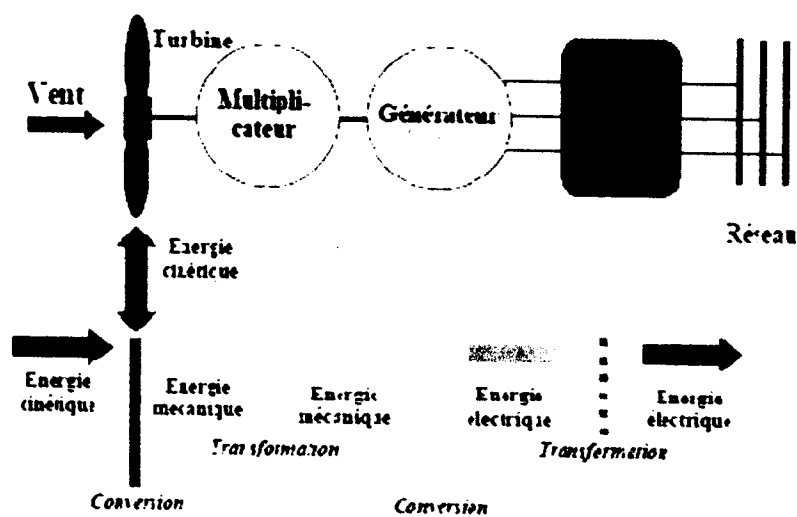


Figure 1-12 Principe de la conversion d'énergie

1-6-2- Constitution

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présentés sur la figure (1-13) :

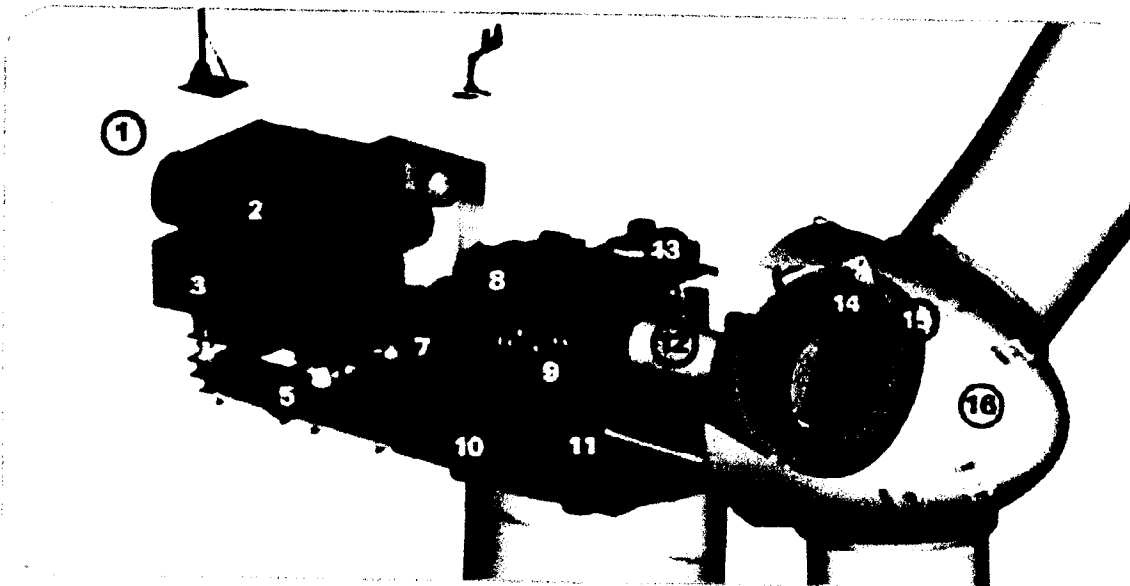


Figure 1-13 : Exemple de système éolien à axe horizontale tripales

Un mât, ou tour, supporte la nacelle (1) et la turbine (16). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. Il est tubulaire et contient une échelle voire un ascenseur. La nacelle (1) partiellement insonorise (6), (9), avec une armature métallique (5), accueille la génératrice (3) et son système de refroidissement (2), le multiplicateur de vitesse (8) et différents équipements électroniques de contrôle (4) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne.

Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent (12) supportant la turbine (16) et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tours/min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7), auquel est accouplé le générateur (3). Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement (13) à huile.

La turbine (16) possède trois pales (15) qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique (14) permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par « mise en drapeau » ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques (10), (11) permet d'orienter la nacelle face au vent.

Un anémomètre et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent.

1-6-3 -Bilan des forces sur une pale [9]

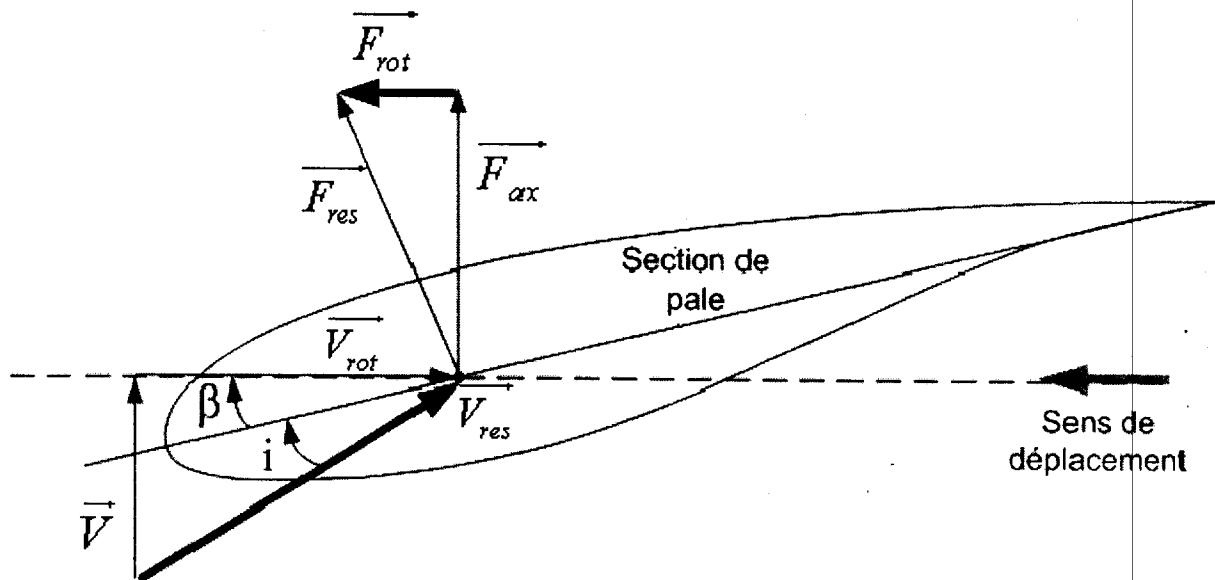


Figure 1-14 Bilan des forces sur une pale

La figure (1-14) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur \vec{V} . Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force \vec{F}_{res} qui se décompose en une poussée axiale \vec{F}_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mât et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

1-7- Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne : [6]

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mât et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnantes : V_d la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_c la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

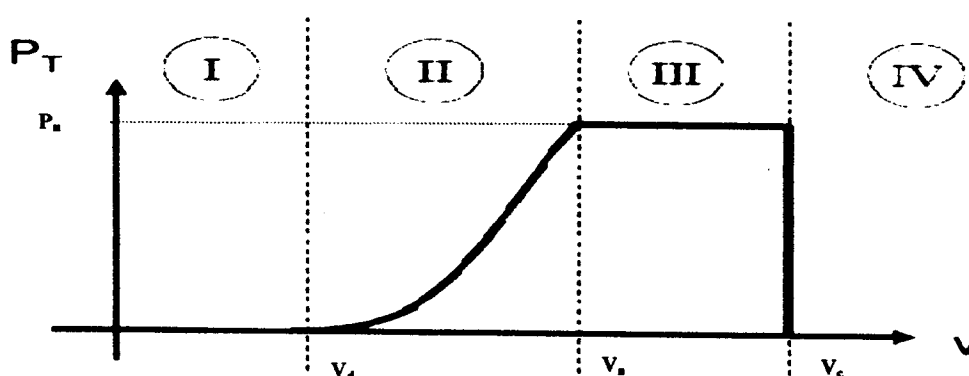


Figure 1-15 Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones :

- la zone I, où $P_{\text{turbine}} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance) ;
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent ;
- la zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{turbine} fournie reste sensiblement égale à P_n ;
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

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

1. Système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses;

2. Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales). Chez certains fabricants de grandes machines, un système hybride se développe, le « stall actif », dans lequel le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le système pitch.

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

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

1-8 -Intérêt de la vitesse variable : [12]

Si on considère les courbes du coefficient de puissance fonction de λ , il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent (λ_{opt}). Un système à deux vitesses de rotation est possible mais la vitesse variable électronique apporte beaucoup plus en terme énergétique.

La figure (1-16) montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage de vitesse dans une plage de 1 à 2 est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques.

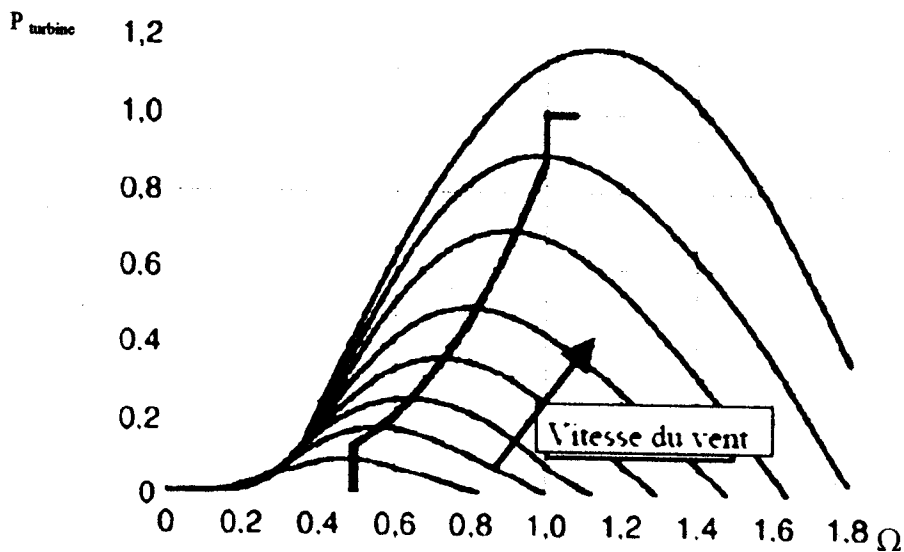


Figure 1-16 Puissance de la turbine en fonction de sa vitesse de rotation, paramétrée en vitesse du vent. La position des maxima est tracée.

1-9- Chaînes de conversion électrique

1-9-1-Systèmes couplés au réseau alternatif [13]

Génératrices asynchrones à cage

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". La première machine qui vient à l'esprit pour de tels systèmes est la génératrice synchrone, cependant le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage jusqu'à des puissances allant au-delà du mégawatt.

Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive et à un démarreur automatique progressif à gradateur permettant de limiter le transitoire d'appel au moment de la connexion au réseau (figure 1-17)

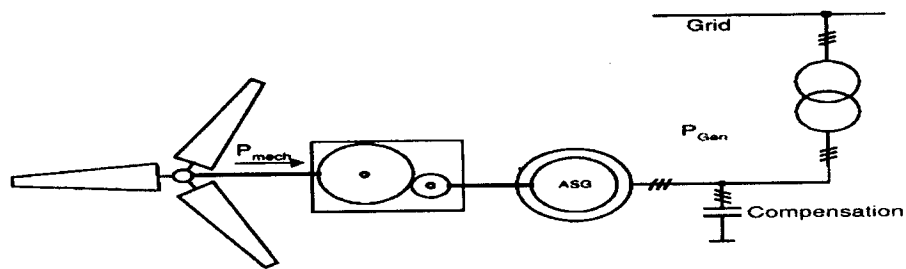


Figure 1-17 : Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage.

Nous avons vu précédemment l'intérêt de la variation de vitesse. Une solution simple assez couramment employée consiste à utiliser des machines asynchrones à cage à 2 configurations polaires du bobinage statorique (système Dahlander) qui procurent deux vitesses sensiblement constantes.

Pour obtenir une vitesse continûment variable, on peut utiliser diverses solutions. Bien que les possibilités soient nombreuses, on rencontre 3 familles de systèmes : les machines asynchrones à rotor bobiné et double alimentation, les machines asynchrones à cage à variateur électronique de fréquence et les machines synchrones également à variateur de fréquence.

Génératrices asynchrones à rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné et à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hyposynchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixe au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré) au réseau. Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme (imposée par le champ tournant : fréquence du réseau sur nombre de paires de pôles de la machine), le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit.

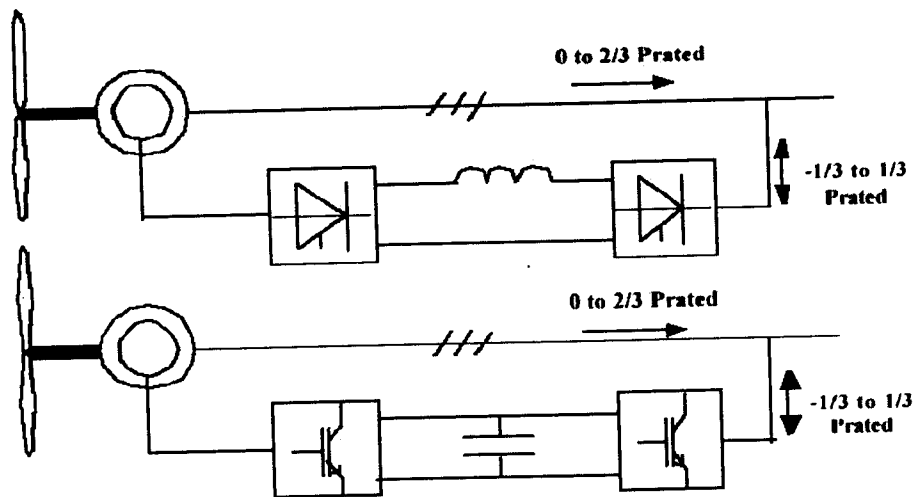


Figure 1-18 Chaînes de conversion à génératrice asynchrone à rotor bobiné [8].

La figure (1-18) montre deux systèmes à double alimentation. Le premier à convertisseurs à thyristors n'est plus utilisé, il présentait trop d'inconvénients en termes de facteur de puissance et de formes d'onde (côté machine et côté réseau). Actuellement, ce sont les systèmes à deux convertisseurs triphasés à modulation de largeur d'impulsion qui sont utilisés (bas de la figure).

Les machines à rotor bobiné nécessitent un rotor sensiblement plus complexe ainsi qu'un système triphasé de bagues et balais pour connecter les enroulements rotoriques au convertisseur. Les problèmes d'usure peuvent conduire à préférer une solution à vitesse variable constituée d'une génératrice asynchrone à cage associée à un convertisseur de fréquence (figure 1-19), mais il ne semble pas qu'elle ait encore trouvé un débouché, sans doute pour des raisons économiques.

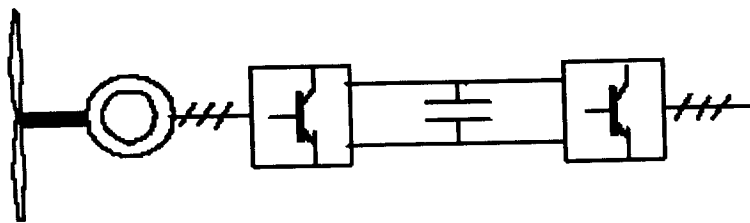


Figure 1-19 Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage et convertisseur de fréquence.

Génératrices synchrones

Enfin, tout particulièrement dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique), on utilise des **machines synchrones**. Leurs performances, notamment en terme de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles, leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable.

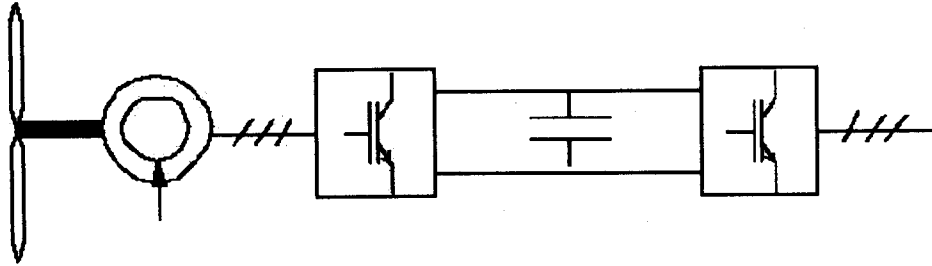


Figure 1-20 Chaîne de conversion à génératrice synchrone à rotor bobiné (ou à aimants) et convertisseur de fréquence.

Les génératrices synchrones à entraînement direct sont encore peu nombreuses, le principal fabricant est Enercon (environ 3000 machines sont déjà en service). L'inducteur (rotor) est bobiné, il nécessite un système bagues lisses-balais pour amener le courant continu. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur MLI.

Pour des raisons de compacité et de rendement, des génératrices synchrones à aimants permanents apparaissent (Jeumont Industrie) et devraient prendre une place croissante dans les prochaines années.

On trouve également des machines synchrones « rapides » associées à un multiplicateur de vitesse, comme chez le constructeur Made (gamme au-delà de 800 kW). Ces machines fonctionnent à vitesse variable, elles débitent sur un redresseur à diodes, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau auquel elles sont connectées.

La figure (1-21) montre une comparaison des performances énergétiques pour différentes chaînes de conversion sur une machine tripale de 600 kW.

La solution de référence est à régulation stall et à génératrice asynchrone à cage à vitesse fixe. La plus performante est à régulation pitch, à entraînement direct de type synchrone. On peut remarquer que c'est aux faibles vitesses de vent que l'on obtient les gains énergétiques les plus importants.

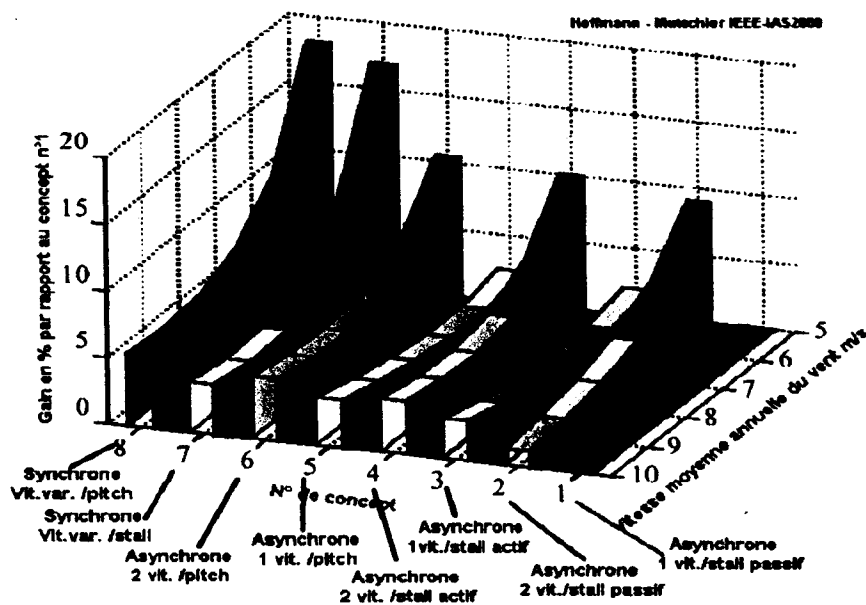


Figure 1-21 : Comparaison des performances énergétiques de différentes chaînes éoliennes

Ces résultats dépendent également du profil des pales, des conditions de vent, notamment de l'intensité des turbulences (ici 10%), de la vitesse de base normalisée (ici $\lambda=6$), du moment d'inertie du rotor (ici 500 kg.m^2)

1-9-2- Systèmes en site isolé

Pour les réseaux de petites puissances en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent diesel.

Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et est autoamorçée par condensateurs [14]. Des batteries électrochimiques peuvent également être associées via un redresseur-onduleur soit pour éviter des démarrages trop fréquents du groupe électrogène, soit pour assurer les transitions.

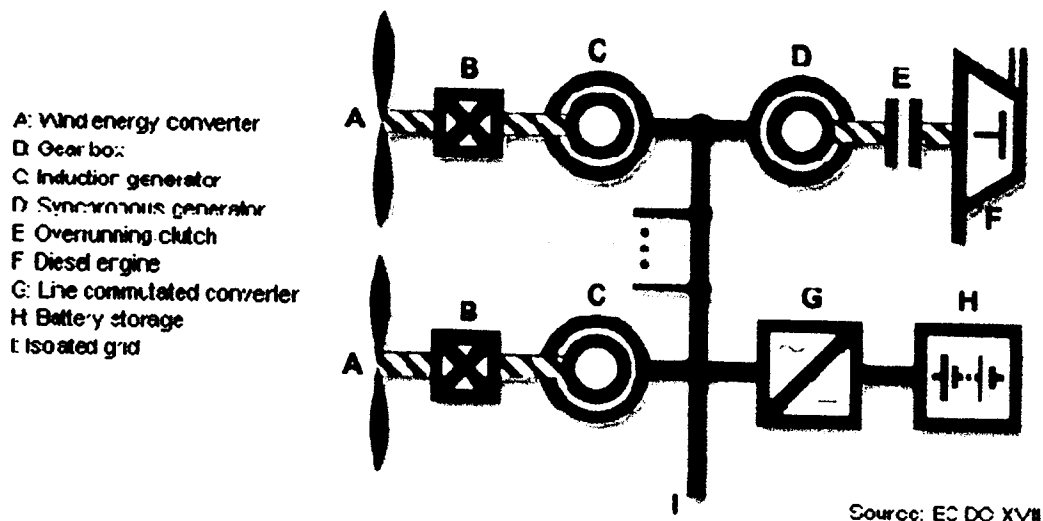


Figure 1-22 Système hybride éolien-diesel

1-9-3- Systèmes couplés à des batteries électrochimiques ou à un bus continu

Soit dans les sites isolés de petite puissance, soit dans des systèmes raccordés au réseau (également en petite puissance), on utilise un bus continu intermédiaire avant de transformer l'énergie en courant alternatif.

Dans le cas des très petites puissances, l'énergie est directement consommée en courant continu. Le bus continu présente l'avantage d'interconnecter plus aisément divers systèmes de production (éolien, photovoltaïque, pile à combustible...) et des batteries électrochimiques qui peuvent se trouver directement en tampon sur de tels bus.

La figure (1-23) montre une solution de plus en plus employée pour associer un aérogénérateur à un tel système. La génératrice est de type synchrone à aimants permanents (entraînement direct comme il s'agit de puissances modestes) débitant directement, à travers un pont de diodes triphasé, sur le bus continu et l'accumulateur électrochimique.

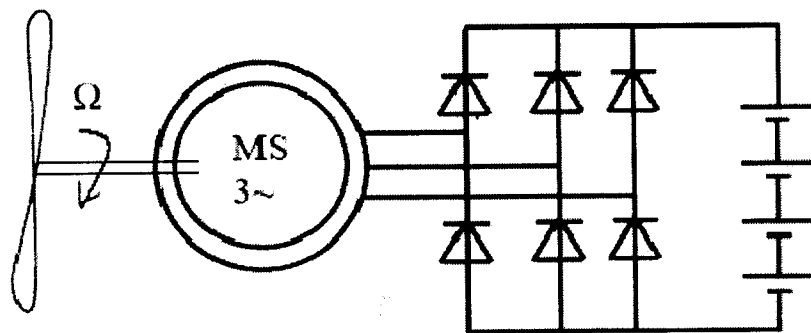


Figure 1-23 : Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu

Le débit direct (à travers un simple redresseur en pont à diodes) de la machine synchrone sur une source de tension continue peut surprendre. En fait, c'est grâce à une inductance d'induit relativement élevée que les courants restent proches de formes sinusoïdales et que les rendements de conversions sont corrects [12]. En cas de surcharge de la batterie (trop de tension), un contacteur met en court-circuit l'induit de la génératrice. La turbine est alors arrêtée en rotation.

1-10- Avantages et désavantages de l'énergie éolienne : [15]

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

1-10-1 Les atouts

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'impacte néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie notamment contribuent à un changement global de climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO_2 a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

augure qu'elle doublera pour 2050 .Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 1000 dernières années. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95cm d'ici l'an de 2100.L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produit par un aérogénérateur supprime une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 million de tonnes de CO₂ ,21 mille tonne de SO₂ et 17.5 mille tonnes de NO_x. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est plus non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs donc on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- Les parcs éoliens se démontent facilement et ne laisse pas de
L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en ligne dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales,
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.

- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelles sources d'énergie traditionnelle.

1-10-2 -Les désavantages :

Même s'il ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel. ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne fassent pas attraper par les aéro turbines.
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastiques, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.

Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants des réseaux électriques sont de plus en plus strictes.

- Le coût d'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classique : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est-à-dire là où il y a le plus de vent, concurrence la plus part des sources d'énergies classiques, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

Bibliographie

- [1] Adam MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, avril 2005
- [2] Renewables In Global Energy Supply. An IEA Fact Sheet. International Energy Agency. Novembre 2002.
- [3] World Energy Council. <http://www.worldenergy.org>
- [4] Agence Nationale Pour la Gestion des Déchets Radioactifs. <http://www.andra.fr/>
- [5] World Energy Outlook 2002. IEA Publications.
- [7] Le baromètre de l'éolien. Systèmes solaires n°159. Février 2004. EurObserv'ER.
- [8] Bernard MULTON, Olivier GERGAUD, Hamid BEN AHMED, «Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002.
- [9] Frédéric POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne -machine asynchrone à cage autonome,-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [10] S. Heier, « Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems », Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [11] Nicolas LAVERDURE, « L'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005
- [12] Olivier GERGAUD, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, décembre 2002.
- [13] S. MÜLLER, M. DEIKE, R.W. DE DONCKER, « Adjustable speed generators for wind turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor », CDROM of the IEEE IAS Conf., oct. 2000.
- [14] A. TOUNZI, « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité. », Journées électrotechnique du club EEA, 28-29 janvier 1999, Paris.
- [15] Salma EL AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'Université de Lille, 2004.

CHAPITRE 2

Critères de choix d'un potentiel éolien

Chapitre2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

Notations utilisées dans le chapitre

Introduction	33
2-1- Critères de choix des sites éoliens	33
2-2- Origine du vent	35
2-3 Mesures du vent	36
2-3-1- Indicateurs écologiques	36
2-3-2- Anémomètres	37
2-4- Variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude	38
2-5- La puissance disponible	39
2-6- Modèles d'ajustement	39
2-6-1- Distribution de Weibull	40
2-6-2- Distribution hybride de Weibull	43
2-6-3- Distribution de Rayleigh	44
2-7- Facteur de puissance et indice de variation	44
2-8- Puissance moyenne annuelle fournie par un aérogénérateur	45
2-9- Gisement éolien en Algérie	45
2-10- Modélisation d'une turbine éolienne	47
2-11- Résultats et interprétation	49
CONCLUSION	54
Bibliographie	56

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

Notations utilisées dans le chapitre 2

a :	facteur de puissance dépend de la rugosité de la surface	(-)
a.d.s :	au dessus du sol	(-)
C, C_1, C_2 :	Facteur d'échelle	(ms^{-1})
$f(V)$:	La fonction de distribution de Weibull	(-)
$f f_0$:	Fréquence de vents calmes	(-)
I_v :	L'indice de variation	(-)
k, k_1, k_2 :	Facteurs de formes	(-)
P :	Pression	(Nm^{-2})
$\langle P \rangle$:	Puissance énergétique éolienne moyenne disponible	(Watt)
$P(V)$:	Fonction de puissance de l'aérogénérateur	(-)
\bar{P} :	Puissance moyenne annuelle fournie par l'aérogénérateur	(Watt)
P_n :	Puissance nominale	(Watt)
R_p :	Facteur de puissance de vent	(-)
S :	Surface de la roue	(m^2)
T :	Température	(K)
T :	Echelle de temps à une année	(heures/an)
V_1 :	Vitesse du vent au niveau Z_1	(ms^{-1})
V_2 :	Vitesse du vent au niveau Z_2	(ms^{-1})
$\langle V \rangle$:	Vitesse moyenne du vent	(ms^{-1})
V_m :	Vitesse optimale de vent	(ms^{-1})
V_0, V_1, V_2 :	Vitesses de vent	(ms^{-1})
$\langle V^3 \rangle$:	Vitesse cubique moyenne du vent	(ms^{-1})
\bar{V} :	Vitesse moyenne du vent	(ms^{-1})
V_m :	Vitesse optimale de vent	(ms^{-1})
V_d, V_n, V_c :	Vitesses de démarrage, nominale et de coupure	(ms^{-1})
Z_1, Z_2 :	Altitudes	(m)
ρ :	Masse volumique de l'aire (1.225)	(kgm^{-3})
Γ :	La fonction GAMMA	(-)
σ :	Ecart type de la distribution de la vitesse	(ms^{-1})

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

σ^2 :	Variance	(-)
α, β et δ :	Constantes sans dimension	(-)

Introduction :

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

Dans le présent chapitre, on s'intéresse à :

- Quantifier la ressource éolienne sur les sites d'application.
- Estimer la puissance moyenne annuelle disponible sur ces sites.

2-1- Critères de choix des sites éoliens

Le vent :

Avant d'implanter une ou plusieurs éoliennes (figure 2-1), l'observation du potentiel éolien, c'est-à-dire l'histoire des vents du site, depuis au moins une décennie, est fondamentale. De plus, pour avoir une idée des variations durant l'année, une étude de la répartition du vent est réalisée sur place pendant cette période [1,2].

En général, un lieu en hauteur et éloigné des habitations est privilégié pour la mise en place de l'éolienne car son efficacité dépend grandement de son emplacement.

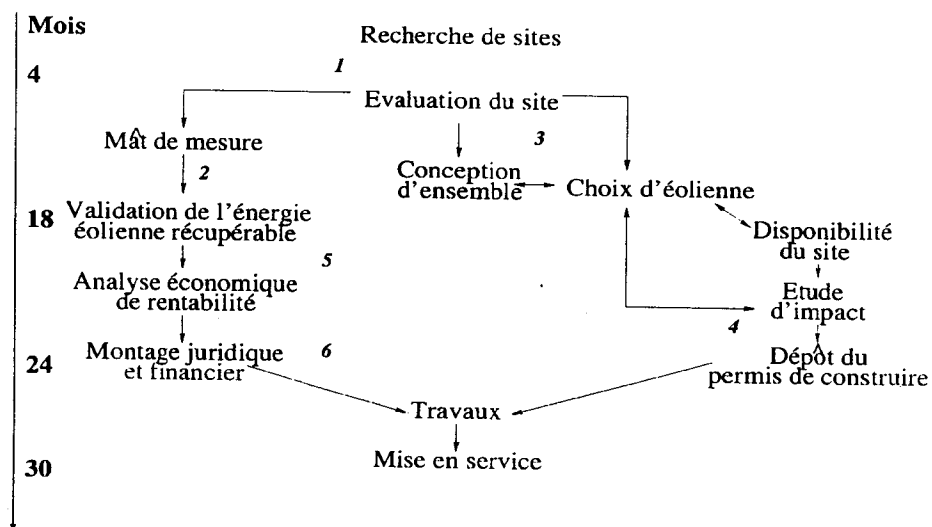


Figure 2-1 Phases d'implantation d'une éolienne [3]

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, et les sites seront d'abord choisis en fonction de la permanence de vents de force suffisante. Un site avec des vents d'environ 30km/h en moyenne sera toujours bien meilleur (de l'ordre de 8 fois) qu'un autre site avec des vents de 15km/h en moyenne.

Un autre critère important pour le choix du site est la constance de la vitesse et de la direction du vent, autrement dit la turbulence du vent. En effet, en règle générale, les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent est supérieure à une valeur comprise entre 10 et 20km/h, sans toutefois atteindre des valeurs excessives qui conduiraient soit à la destruction de l'éolienne, soit à des coûts de construction et de maintenance prohibitifs. La vitesse du vent doit donc être comprise le plus souvent possible entre ces deux valeurs pour un fonctionnement optimal de l'éolienne. De même, l'axe de rotation de l'éolienne doit rester le plus clair du temps parallèle à la direction du vent. Même avec un système d'orientation de la nacelle performant, il est donc préférable d'avoir un vent le moins fluctuant possible dans sa direction pour obtenir un rendement optimal.

Certains sites sont ainsi à proscrire car le vent est trop turbulent : la proximité d'obstacles (arbres, bâtiments, escarpements...).

On recherche habituellement les sites propices à l'installation d'éoliennes en observant les arbres et la végétation. Le site est intéressant s'ils sont constamment courbés par les vents. Une autre façon de procéder est d'utiliser une carte de la vitesse des vents, ou des données accumulées par une station météorologique proche.

Certains sites bien spécifiques sont particulièrement propices à un bon rendement :

- *L'effet tunnel ou effet Venturi* : au niveau des cols entre deux montagnes, ou entre deux grands bâtiments, le vent est souvent plus fort. L'air est comprimé entre les montagnes ou les bâtiments, et, pour garder un débit d'air constant, la vitesse augmente donc considérablement. De plus, le vent garde souvent une direction constante. Ces lieux sont donc très appropriés pour les éoliennes. Le problème est qu'ils sont souvent restreints et qu'il est difficile d'y placer une grande quantité d'éoliennes.

- La mer et les lacs sont aussi des emplacements de choix : il n'y a aucun obstacle au vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse importante. La proximité d'une côte escarpée, en revanche, créera également des turbulences à éviter. [4]

2-2- Origine du vent

L'air constituant l'atmosphère est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides. Sa composition est relativement constante jusqu'à une altitude de 85 km et est majoritairement composée d'azote, d'oxygène et d'argon (99,97 %). Les 9/10^{ème} de sa masse sont situés à une altitude de moins de 16km, dans les basses couches atmosphériques. Au sein de ces couches, le déplacement des masses d'air, appelé vent, est le résultat de la mise à l'équilibre d'un ensemble de forces qui sont [5]:

- **les forces de pression** : ces forces génèrent les déplacements des masses d'air constituant le vent. Elles proviennent des différences locales de pression dues aux différences de température en fonction de la latitude, et des influences continentales et océaniques. Elles sont perpendiculaires aux surfaces isobares et dirigées des hautes vers les basses pressions,
- **la force de Coriolis** : cette force est liée à la rotation de la Terre sur son axe. Elle est perpendiculaire à la vitesse du vent et orientée vers l'est dans l'hémisphère Nord. Elle n'est significative que pour les déplacements atmosphériques de haute altitude en raison de la faiblesse relative des autres forces en présence,
- **les forces de frottement** : ces forces traduisent la friction turbulente de l'air sur le sol.

On peut ainsi scinder la zone dite des basses couches atmosphériques en deux parties distinctes :

1. l'atmosphère libre et la couche limite atmosphérique (CLA). Cette distinction se base sur la nature des forces dominantes [5].
2. l'atmosphère libre est le siège d'un vent uniforme, horizontal et peu turbulent de vitesse constante.

Chapitre2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

C'est le vent dit géostrophique. Les forces de pression et de Coriolis sont prépondérantes et les forces de frottements négligeables,

3. la couche limite atmosphérique est le lieu d'application des forces de frottement. Ces forces induisent un comportement complexe du fluide atmosphérique.

2-3 Mesures du vent :

La connaissance des caractéristiques du vent à des sites prévus est indispensable pour que la planification et la réalisation des projets d'énergie éolienne soient réussies. Nous avons besoin pour une telle analyse la vitesse et la direction du vent à différentes échelles de temps. Les données du vent d'une station météorologique proche peuvent nous donner une meilleure compréhension sur le spectre du vent convenable pour un site. Ce pendant pour une analyse précise, la vitesse et la direction du vent au site spécifié doit être mesuré à l'aide des instruments précis et fiables tels que les anémomètres. [6]

2-3-1- Indicateurs écologiques :

Parmi les indicateurs écologiques on peut citer par exemple :

- les dunes de sable : Les particules du sable ramassées et transportées par le vent, sont redéposées lorsque la vitesse du vent devient basse.
- Les arbres peuvent être déformés à cause des vents forts. l'intensité et la nature de ces déformations dépendent de la force du vent.

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

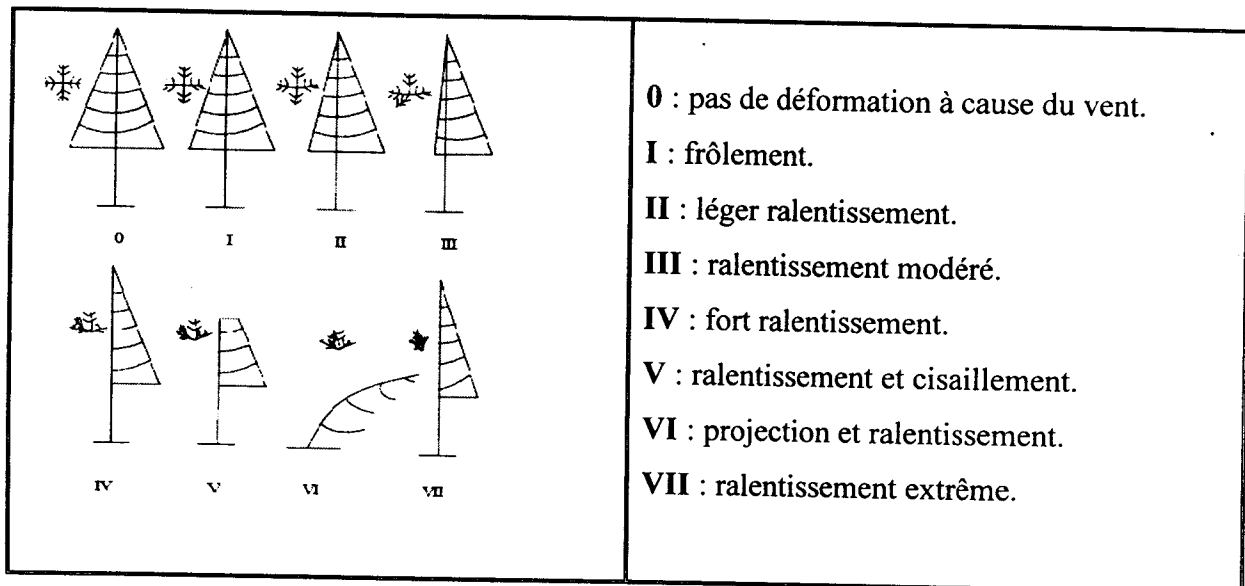


Figure 2-2 échelles d'estimation biologique pour la vitesse du vent

Cette méthode est spécialement convenable pour juger la vitesse du vent dans les vallées, les côtes et les montagnes.

2-3-2- Anémomètres :

Avec des données du vent disponibles des stations météorologiques, ces indicateurs peuvent nous donner une idée sur la convenance d'un site donné pour l'extraction de l'énergie éolienne.

Il y a différents types des anémomètres figure (2-3). En se basant sur le principe de fonctionnement, ils peuvent être classés comme :

- Anémomètres cinématiques (ex : Anémomètre coupelle).
- Anémomètres dynamiques (ex : Anémomètre à plaque).
- Anémomètre thermoélectrique.
- Anémomètre sonique.

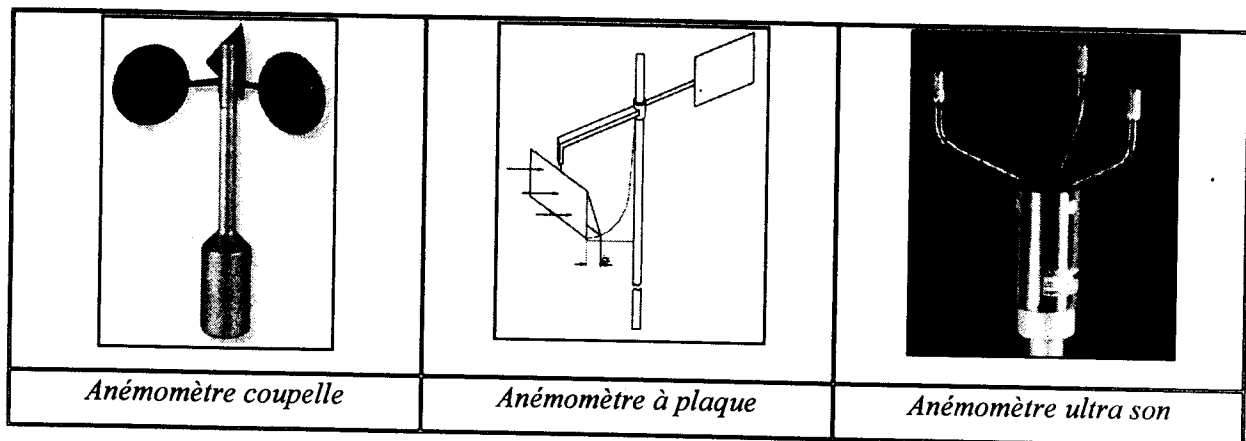


Figure 2-3 Types d'anémomètre

2-4- Variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude :

La vitesse du vent augmente en fonction de l'altitude. Le taux d'augmentation dépend en partie de l'altitude et en partie du relief naturel. En effet, les terrains accidentés comportant des arbres touffus, buissons ou bâtiments de hauteur inégale sont des zones à turbulence, tandis qu'un terrain plat exempt d'obstacles (comme la surface de la mer ou les prairies) facilite la libre circulation du vent avec une vitesse importante en surface. La relation entre la vitesse du vent et l'altitude peut être approximativement représentée par la relation suivante:

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^a \quad (2,1)$$

avec V_1 vitesse du vent à l'altitude Z_1 et V_2 vitesse du vent de référence mesurée à l'altitude Z_2 . "a" un facteur de puissance qui dépend, de la rugosité de la surface, certaines valeurs typiques sont indiquées dans le tableau 2-1:

Nature du terrain	a
Mer clame ou sable	0,10
Végétation herbacée basse	0,13
Herbes hautes et petits buissons	0,19
Bois et zones urbaines	0,32

Tableau 2-1 : Les valeurs typiques de la rugosité de la surface

2-5- La puissance disponible [9] :

La puissance énergétique éolienne moyenne disponible, associée à une circulation d'une masse d'air à une vitesse $\langle V \rangle$ et agissant sur une surface S , de la roue d'une éolienne s'écrit:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} \rho S \langle V^3 \rangle \quad (2.2)$$

ρ désigne la masse volumique, paramètre variant avec la latitude et la température. Mais généralement considérée comme constante et avoisinant en moyenne 1.225 kg/m^3 .

L'expression précédente montre que la puissance disponible varie avec la vitesse cubique moyenne du vent. Cette dernière est déterminée à partir d'un traitement statistique des données vent brutes et le calcul des fréquences à un seuil donné de vitesse, [7].

2-6- Modèles d'ajustement :

De part la forme des nuages de points obtenus, les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont été orientées vers des modèles associant puissance et exponentielle. Les modèles usuels étant :

- la distribution de Weibull ;
- la distribution hybride de Weibull ;
- la distribution de Rayleigh.

2-6-1- Distribution de Weibull :

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull . Sa densité de probabilité se présente sous la forme:

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (2,3)$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité $f(V)$ représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées.

k et C sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull.

Le paramètre k (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que C détermine la qualité du vent (facteur d'échelle), ce dernier a la dimension d'une vitesse.

La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes.

La fonction de répartition est donnée par :

$$f(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right) \quad (2,4)$$

$$f(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right) \quad (2,5)$$

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

$$f(V_x \leq V \leq V_y) = \int_{V_x}^{V_y} f(V) dV = \exp\left[-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_y}{c}\right)^k\right] \quad (2,6)$$

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

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

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} f(V) dV = C \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (2,7)$$

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

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt \quad \text{avec } x > 0 \quad (2,8)$$

L'écart type de la distribution est donné par :

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (V - \bar{V})^2 P(V) dV = C^2 \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right] \quad (2,9)$$

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

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 P(V) dV = C^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (2,10)$$

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

$$\frac{\bar{V}}{C} = \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (2,11)$$

$$\frac{\sigma}{\bar{V}} = \left[\frac{\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right)}{\Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right)} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2,12)$$

$$\frac{\langle V^3 \rangle}{\bar{V}^3} = \frac{\Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right)}{\Gamma^3 \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (2,13)$$

$$\frac{V_m}{\bar{V}} = \frac{(\ln 2)^{\frac{1}{k}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.14)$$

Les valeurs de la vitesse du vent (V_0), (V_1), (V_3) qui ont l'influence la plus grande sur la loi de distribution, et la vitesse moyenne peuvent être calculées en cherchant le maximum de la fonction.

$$\frac{V_0}{\bar{V}} = \frac{\left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1}{k}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.15)$$

$$\frac{V_1}{\bar{V}} = \frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.16)$$

$$\frac{V_3}{\bar{V}} = \frac{\left(\frac{k-2}{k}\right)^{\frac{1}{k}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.17)$$

On détermine la caractéristique du vent à une hauteur quelconque du rotor, en utilisant la méthode de Justus [8] qui est :

$$C_2 = C_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{(\alpha k)} \quad (2.18)$$

Où :

$$\alpha k = \frac{1}{\ln\left(\frac{\sqrt{z_1 z_2}}{z_0}\right)} - 0.0881 \ln\left(\frac{C_1}{6}\right) \quad (2.19)$$

Avec :

z_1 : Hauteur de référence égale à 10 m a.d.s [m],

z_2 : Hauteur désirée a.d.s [m],

α : Paramètre de rugosité du sol égale 0.01m [m],

C_1 : Paramètre d'échelle à 10 m a.d.s [m/s]. (a.d.s : au dessus du sol.)

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

Pour le facteur de forme k

$$k_2 = \frac{k_1}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)} \quad (2.20)$$

avec : k_1 : Paramètre de forme à 10 m a.d.s (-),

La densité de puissance moyenne annuelle récupérable $\langle P \rangle_{\text{moy}}$ exprimée en kWh/m². On se calcule à partir de la formule suivante :

$$\langle P \rangle_{\text{moy}} = T \langle P_i \rangle \quad (2.21)$$

Avec :

$$P_i = 0.37 \langle V_i^3 \rangle \quad (2.22)$$

Où :

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

Enfin la densité de puissance moyenne annuelle récupérable est :

$$\langle P \rangle_{\text{moy}} = 32.5 \langle V_i^3 \rangle \quad (2.23)$$

2-6-2- Distribution hybride de Weibull :

La distribution hybride de Weibull, est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée, sur un site donné, est supérieure ou égale à 15%. En effet, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien. Cette distribution s'écrit :

$$f(V) = (1 - ff_0) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad \text{pour } V > 0 \quad (2.24)$$

$$f(V) = ff_0 \quad \text{pour } V=0 \quad (2.25)$$

2-6-3- Distribution de Rayleigh :

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme k est égal à 2.

Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(V) = 2 \frac{V}{c^2} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^2\right) \quad (2,26)$$

Toutefois la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée.

L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites.

2-7- Facteur de puissance et indice de variation :

Par ailleurs, d'autres paramètres utiles à la caractérisation d'un site, du point de vue éolien, doivent être calculés, à savoir :

- Le facteur de puissance du vent, donné par (selon la distribution de Weibull) :

$$R_p = \frac{\langle V^3 \rangle}{\langle V \rangle^3} \frac{\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (2,27)$$

- L'indice de variation donné par (selon la distribution de Weibull) :

$$I_v = \frac{\sigma}{\langle V \rangle} = \left[\frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)} - 1 \right]^{1/2} \quad (2,28)$$

2-8- Puissance moyenne annuelle fournie par un aérogénérateur

La puissance moyenne produite par un aérogénérateur peut être évaluée en combinant sa courbe de puissance avec la distribution de la vitesse du vent sélectionné [9]. Elle est donnée par :

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(V)f(V)dV \quad (2.29)$$

Avec :

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

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

2-9-Gisement éolien en Algérie :

La ressource éolienne en Algérie, varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien.

Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

La carte représentée en figure (2-4) montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-Ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au sud. [10]

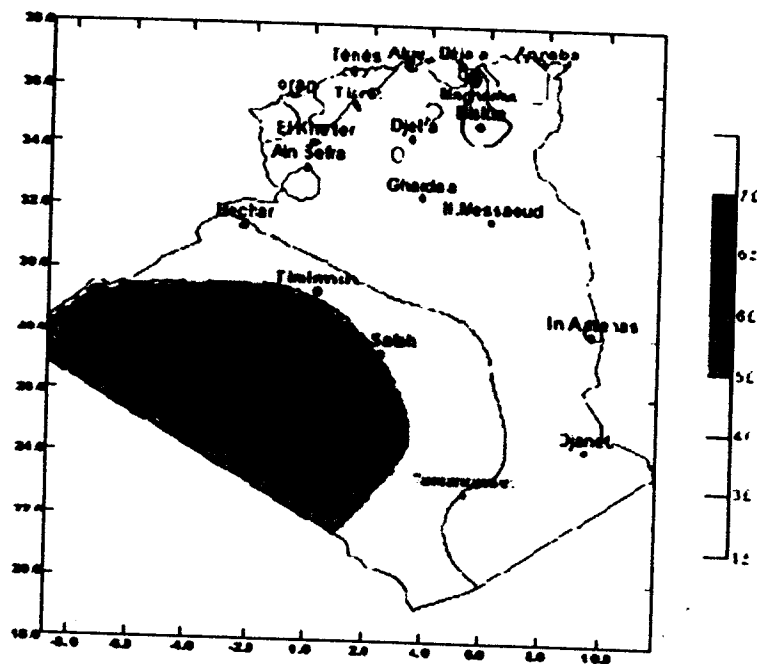


Figure 2-4 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Les cartes saisonnières représentées en figure (2-5) montrent clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventées que le reste des saisons et que le printemps en est la plus ventée. Néanmoins, on remarque que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver. D'un autre côté, de régions telles que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisés par une vitesse relativement constante tout au long de l'année.

$$P(V) = \begin{cases} 0, & \text{si } V < V_d \\ \alpha + \beta \cdot V + \gamma \cdot V^2, & \text{si } V_d < V < V_n \\ P_n, & \text{si } V_n < V < V_c \\ 0, & \text{si } V > V_c \end{cases} \quad (2,30)$$

Avec :

α , β et γ sont déterminés par les conditions suivantes :

$$\left. \begin{aligned} \alpha + \beta \cdot V_d + \gamma \cdot V_d^2 &= 0 \\ \alpha + \beta \cdot V_n + \gamma \cdot V_n^2 &= P_n \\ \alpha + \beta \cdot (V_d + V_n) + \delta(V_d + V_n)^3 &= P_n \left(\frac{V_d + V_n}{V_n} \right)^3 \end{aligned} \right\} \quad (2,31)$$

Avec :

V_d : Vitesse de démarrage [m/s],

V_n : Vitesse nominale [m/s],

V_c : Vitesse de coupure [m/s],

P_n : Puissance nominale [Watt].

L'intégrale (2-29) va s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \int_{V_d}^{V_n} (\alpha + \beta \cdot V + \delta \cdot V^2) \frac{K_1}{C_1} \left(\frac{V}{C_1} \right)^{K_1-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{K_1}\right) \cdot dV \\ &\quad + \underbrace{\int_{V_d}^{V_n} (P_n) \cdot \frac{K_1}{C_1} \left(\frac{V}{C_1} \right)^{K_1-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{K_1}\right) \cdot dV}_{I_2} \end{aligned} \quad (2,32)$$

L'intégrale I_2 :

$$I_2 = \int_{V_n}^{V_c} P_n \frac{k_1}{c_1} \left(\frac{V}{c_1} \right)^{k_1-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c_1}\right)^{k_1}\right) \cdot dV \quad (2,33)$$

s'écrit sous forme :

$$I_2 = P_n(F(V) - F(V_n)) \quad (2,34)$$

Donc l'intégrale (2,32) s'écrit sous la forme suivante

$$\bar{P} = \int_{V_d}^{V_n} (\alpha + \beta V + \gamma V^2) \frac{k_1}{c_1} \left(\frac{V}{c_1}\right)^{k_1-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c_1}\right)^{k_1}\right) dV + P_n \left[\exp\left[-\left(\frac{V_n}{c_1}\right)^{k_1}\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_c}{c_1}\right)^{k_1}\right] \right] \quad (2,35)$$

2-11- Résultats et interprétation :

Les paramètres de Weibull sont déterminés à l'échelle annuelle et mensuelle après traitement et analyse des données tri-horaires, de vitesse et direction du vent.

Pour illustrer l'étude nous avons considéré trois aérogénérateurs du commerce pour les trois sites qui nous intéressent (Ghardaïa, Tlemcen et Djelfa) couvrant une large gamme de puissances dont les caractéristiques sont données dans le tableau 2-2 :

Site	Pn(Watt)	Vd (m/s)	Vn (m/s)	Vc (m/s)
Ghardaïa (k=1.65 ; c=5.6)	2000	3	8	16
Tlemcen(k=2.12 ; c=4.7)	1000	1	6	12
Djelfa(k=1.71 ; c=4.35)	1500	3	8	12

Tableau 2-2 -Caractéristiques des aérogénérateurs choisis

La distribution de Weibull est caractérisée par deux paramètres :

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

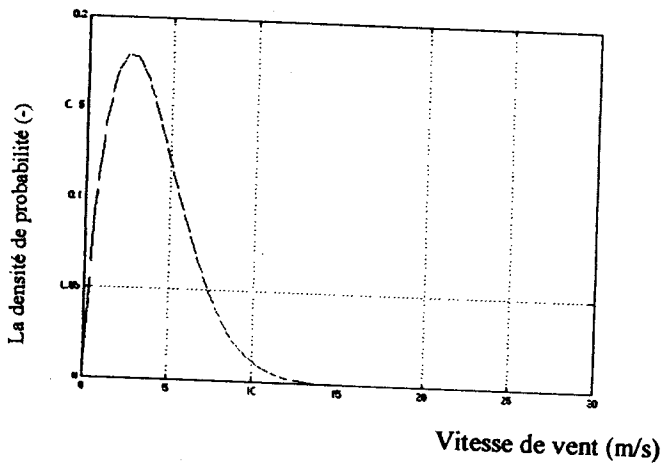
Les données des vents fournies par les services météorologiques sur une période continue de dix (10) années et enregistrées, à 10 mètres du sol, au niveau des trois sites ont été traitées selon le modèle de Weibull. Les distributions respectives sont représentées dans la figure 2-6.

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

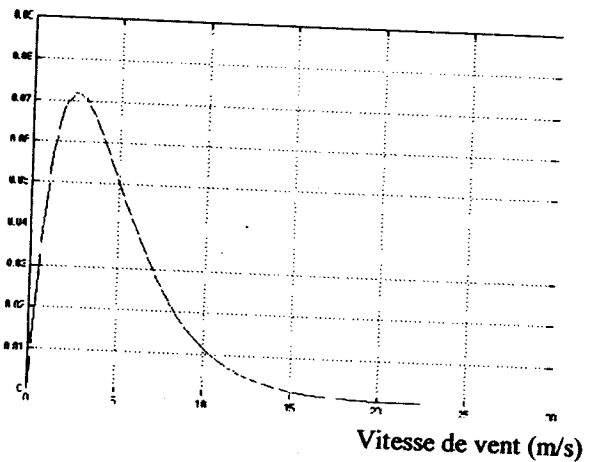
On remarque que chaque une des trois courbes atteint un maximum pour une certaine vitesse, qu'elle décroît au fur et à mesure que la vitesse augmente jusqu'à s'annuler complètement.

C'est la représentation de la distribution des fréquences des vitesses moyennes et tri horaires pour une classe donnée de k et C des paramètres de Weibull.

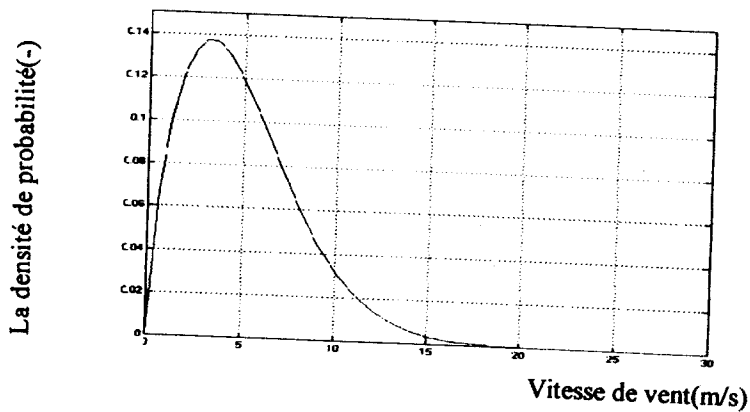
On remarque que les distributions de Tlemcen et Djelfa sont assez proches et que le site de Ghardaïa se démarque avec un facteur de forme plus faible (distribution plus ramassée autour de la moyenne). Les trois sites présentent des régimes de vent pouvant atteindre les 24 m/s.



Figure(2.6.b) Djelfa



Figure(2.6.a) Tlemcen



Figure(2.6.c) Ghardaïa

Figure 2-6 Distribution de Weibull à 10 mètres a.d.s

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

L'extrapolation verticale du paramètre de forme k montre que celui-ci augmente avec la hauteur (Voir Figure 2-7) pour une rugosité de 0.01 mètres ce qui est logique. (d'après l'équation (2-20) ce paramètre n'est fonction que de la hauteur). les trois courbes des trois sites ont la même allure.

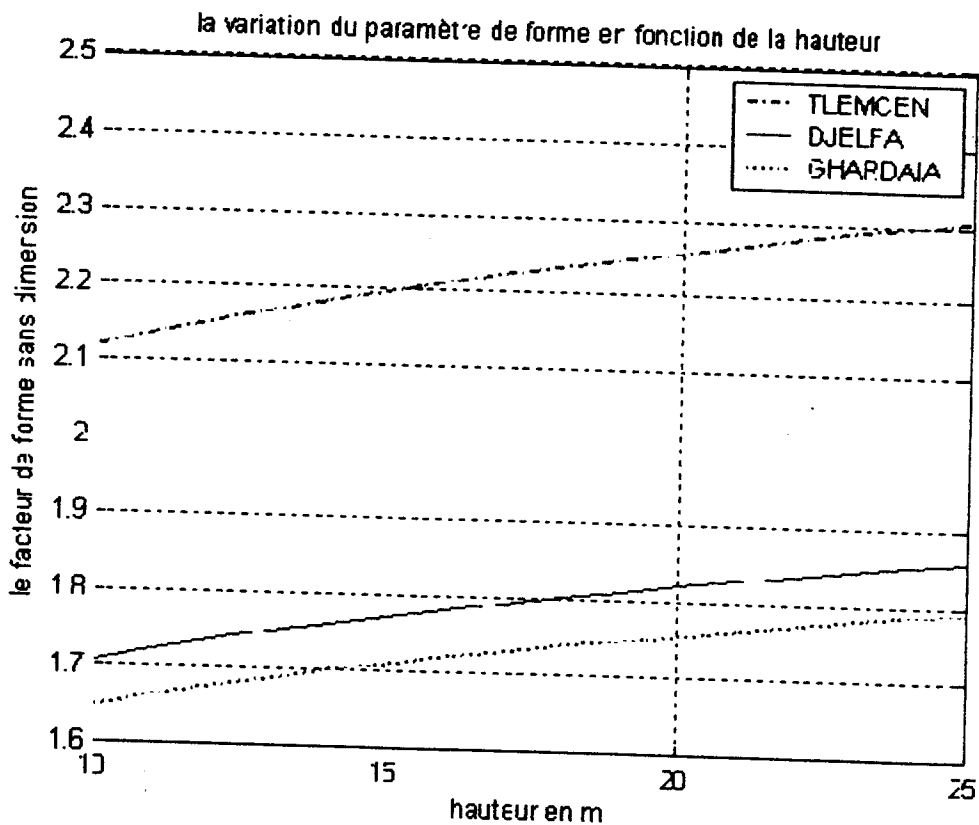


Figure 2-7 : La variation de paramètre de forme k en fonction de la hauteur.

Par contre l'extrapolation verticale du paramètre d'échelle C avec la hauteur (Voir Figure 2.8) montre un changement rapide près du sol où les frottements interviennent de manière énorme car ce paramètre est faible pour une faible rugosité du sol et grand pour une rugosité du sol grande.

L'influence des paramètres atmosphériques (T, P) est très grande à une hauteur de 20 m, ce qui est illustré par un brusque changement de l'allure de chaque courbe.

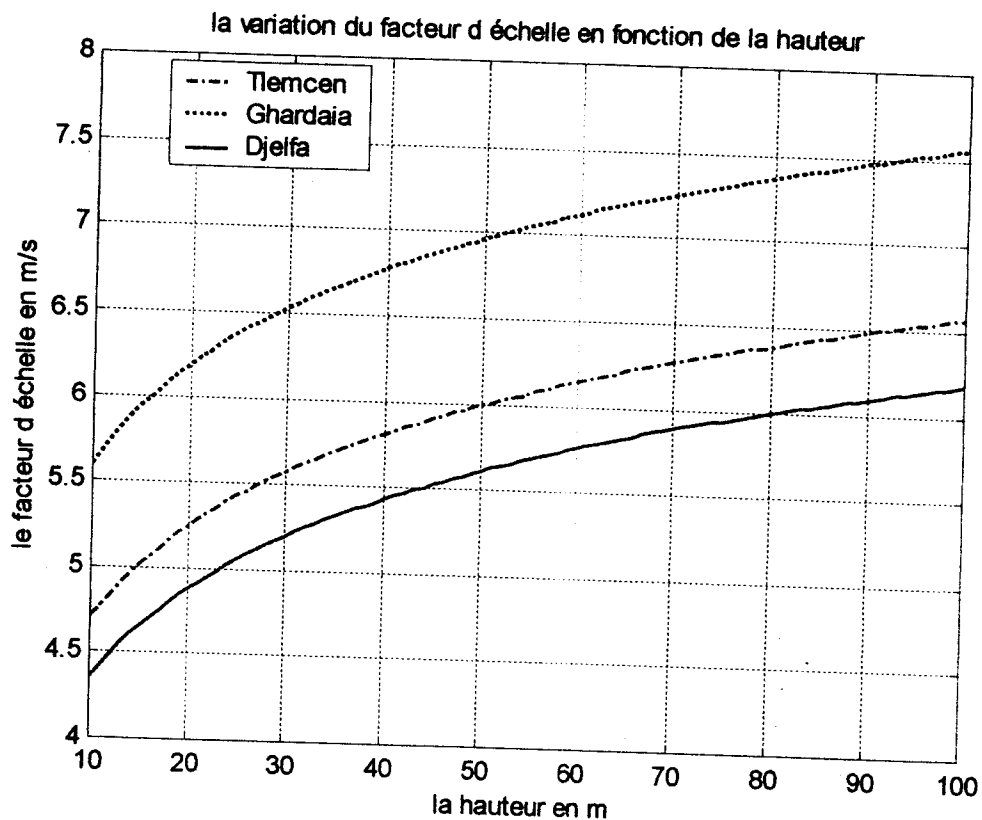


Figure 2-8 Variation du paramètre C avec la hauteur

A 10 m

Sites	k_1	C_1	V_1
Tlemcen	2.12	4.70	2.60
Ghardaïa	1.65	5.6	4.03
Djelfa	1.71	4.35	3.66

Tableau 2-2 Caractéristique de les trois sites à 10 a.d.s

A 25 m

Sites	k_2	C_2	V_2
Tlemcen	2.3059	5.6782	2.9449
Ghardaïa	1.7947	6.6389	4.5306
Djelfa	1.8600	5.2994	4.1455

Tableau 2-3 Caractéristique de les trois sites à 25 a.d.s

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

Généralement les vitesses sont mesurées auprès des stations de l'ONM, à une hauteur normalisée égale à 10 mètres du sol. Toutefois, les aérogénérateurs commercialisés sont installés à des hauteurs supérieures ou égales à 25 mètres du sol. Les caractéristiques du site doivent être corrigées en utilisant un modèle d'extrapolation.

Il est intéressant de voir comment varie la vitesse moyenne du vent avec la hauteur, afin de déterminer la hauteur optimale du mât. Cette variation est montrée sur la figure (2-9) représentant la variation du gradient de la vitesse du vent en fonction de l'altitude pour les trois sites choisis. On remarque une forte variation sur les 10 premiers mètres puis une évolution asymptotique à partir de 20 à 25 mètres. Il est donc inutile d'aller au-delà sauf nécessité (diamètre de la roue).

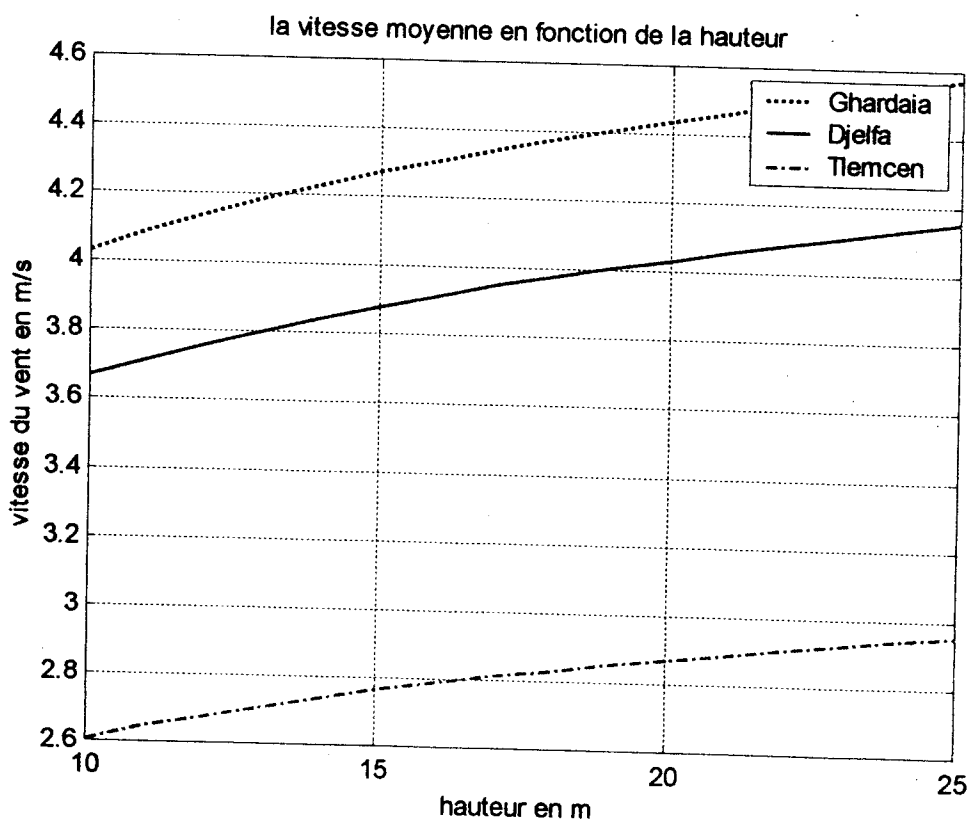


Figure 2-9 Variation de la vitesse en fonction de la hauteur

Chapitre 2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

Compte tenu des potentialités des sites et des caractéristiques des machines, les puissances fournies par les trois aérogénérateurs installés sur les trois sites choisis sont représentées dans la figure (2-10) (le programme est donné dans l'annexe A) On remarque que les aérogénérateurs de 1500 et 2000 kW présentent des résultats pratiquement identiques ce qui mérite réflexion compte tenu des différences de coût.

Le site de Tlemcen offre un potentiel énergétique éolien assez faible et ne peut être rentable que pour des systèmes de petites puissances

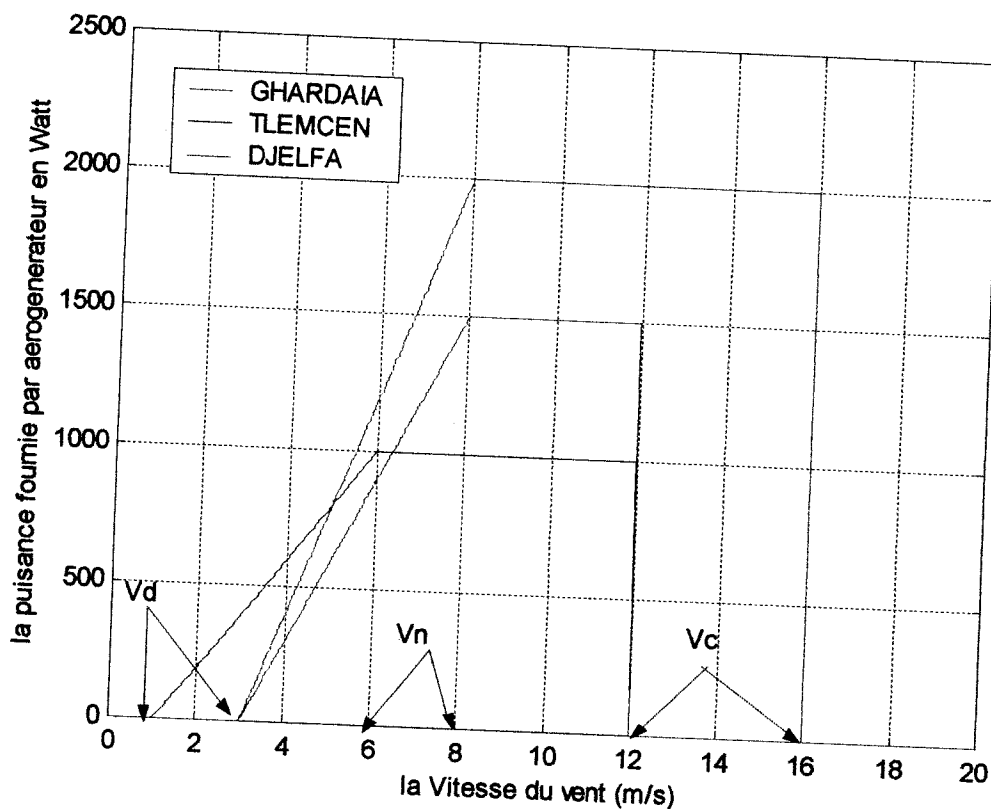


Figure 2-10 Variation de la puissance fournie par chaque aérogénérateur en fonction de la vitesse de vent.

CONCLUSION

Dans ce chapitre on a étudié les caractéristiques des trois sites par rapport aux données climatiques. Le traçage de la densité de probabilité de Weibull représente la distribution des vitesses moyennes trihoraire pour une classe donnée de k et C , on a vu que ces derniers paramètres dépendent de la hauteur et la même chose pour la vitesse du vent.

Chapitre2 : Critères de choix d'un potentiel éolien

D'après ces résultats on a conclu que la hauteur de pylône influe sur le rendement d'un aérogénérateur.

Le site de Ghardaïa présente un potentiel énergétique plus fiable que les deux autres sites Tlemcen et Djelfa qui offrent un potentiel énergétique éolien assez faible, et ne peuvent être rentable que pour des systèmes de petite puissance

Dans ce but nous allons faire dans le troisième chapitre une étude complète pour dimensionner un aérogénérateur afin d'avoir un meilleur rendement dans les trois sites.

Bibliographie

- [1] www.ademe.fr/bretagne/actions-phares/energies-renouvelables, « Les actions phares de la délégation en Bretagne de l'A.D.E.M.E ».
- [2] Olivier LANGLOIS, « Raccordement d'éoliennes de petite puissance intégrées au bâtiment », Contrat avec EDF R&D, DEA Génie Electrique de l'INPT, Septembre 2002.
- [3] Mathilde LAPIE, « Modélisation du comportement dynamique d'éoliennes de moyenne et forte puissance à axe horizontal », Thèse de doctorat, Université de Lille, 2005.
- [4] www.windturbin.com
- [5] G. Turbeli, « Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent », Thèse de doctorat, Centre d'Etudes Dynamiques d'Ile de France, 2000.
- [6] DERGAL. Malika, « mpage de l'eau à l'aide de l'énergie éolienne au service des zones rurales », thèse de magister, Université de Tlemcen, 2001.
- [7] Kasbadji Merzouk N. et H. Daaou, « Atlas Energétique Eolien de l'Algérie », SIPE5, Béchar, Algérie 2000.
- [8] MRED Laaradj, « Contribution à l'étude d'un système d'aérogénérateur à rendement élevé, Application au site Tlemcen », thèse de magister, Université de Tlemcen, 2001.
- [9] Nachida KASBADJI MERZOUK, « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en ALGERIE », thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 2006.
- [10] Souad BOUSSALEM, « Etude de performances d'un système de pompage éolien », thèse de magister, Université de Tlemcen, 2005.
- [11] L.AICHE-HAMANE, A.KHELLAF, « Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie », Congrès sur le photovoltaïque et l'énergie éolienne (IPCWE), Tlemcen, Algérie (Novembre 2003).

CHAPITRE 3

*Spécifications et
Dimensionnements*

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

Notations utilisées dans le chapitre	57
Introduction	57
3-1-Pour quoi choisissant le moteur à courant continu	57
3-2-Définition de moteur à courant continu	58
3-2-1-Constitution d'un moteur à courant continu	58
3-2-2-Principe de fonctionnement	59
3-3 - Modèle théorique de la machine à courant continu	60
3-4 - Modèle théorique du système mécanique multi-masses	62
3-5- Outils de simulation MATLAB/SIMULINK	62
3-5-1- Matlab	63
3-5-2- Simulink	64
3-6 - Données numériques d'un entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu	65
3-7-Simulation du modèle de l'entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu sous Matlab-Simulink	67
3-8-Modèle théorique de la turbine à vent	69
3-9- Description et données numériques d'un modèle 2-masses d'une éolienne à base de la génératrice à courant continu	71
3-10 - Simulation du système de l'éolienne à base de la génératrice à courant continu sous Matlab-Simulink	80
Conclusion	82
Bibliographie	

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

Notations utilisées dans le chapitre 3

a : Angle d'attaque des pales	(°)
C_{ri} : Couple résistant appliqué à la $i^{\text{ème}}$ masse	(N.m)
C_i : Couple appliqué à l'élément i	(N.m)
C_e : Couple électromagnétique	(N.m)
C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne	(-)
D : Diamètre du rotor	(m)
I_e : Courant d'excitation	(A)
I_i : Courant d'induit	(A)
J_i : Moment d'inertie de la $i^{\text{ème}}$ masse	(kg.m ²)
J_T : Moment d'inertie de la turbine	(kgm ²)
J_G : Moment d'inertie du générateur	(kgm ²)
$K_{i,i+1}$: Coefficient de rigidité	(Nm/rad)
L_e : Inductance du circuit d'excitation	(H)
L_a : Inductance du circuit d'induit	(H)
L_{ea} : Inductance mutuelle induit inducteur	(H)
L : le LAGRENGIEN	(-)
MCC : Machine à courant continu	
m : Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s	(Kg)
P : Puissance captée par la turbine	(Watt)
P : Nombre de paires de pôles	(-)
P_n : Puissance nominale de la turbine	(Watt)
R : Rayon de l'hélice	(m)
R_e : Résistance du circuit d'excitation	(Ohm)
R_a : Résistance du circuit d'induit	(Ohm)
S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne	(m ²)
T_m : Couple mécanique à la sortie de la turbine	(N.m)
T_e : Constante de temps	(s)
U_e : Tension d'excitation	(V)

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

U_a : Tension aux bornes de l'induit	(V)
V : Vitesse du vent	(m/s)
W_c : L'énergie cinétique du système	(J)
W_p : L'énergie potentielle du système	(J)
W_d : L'énergie dissipée	(J)
$\beta_{i,i+1}$: Coefficient d'amortissement	(Nms/rad)
$\theta_{i,i}$: Déplacement de l'élément i	(rad)
λ : Rapport de la vitesse périphérique	(-)
ρ : Densité de l'air (1,225)	(kg.m ³)
γ : Rapport de vitesse périphérique	(-)
Ω : Vitesse angulaire du rotor	(rad/s)
Ω_i : Vitesse angulaire de l'ième masse	(rad/s)
Ω_1 : Vitesses angulaires de la 1 ^{ère} masse	(rad/s)
Ω_2 : Vitesses angulaires de la 2 ^{ème} masse	(rad/s)

Introduction :

De nombreux systèmes électromécaniques peuvent être modélisés en tant que systèmes multimasses, composés d'une machine électrique et d'une charge mécanique interconnectées par un arbre flexible, à savoir: les systèmes de laminage, les ponts roulant, les systèmes d'entraînement d'antennes, les robots, les moulins de papier, les élévateurs, les machines-outils, les presses-imprimantes, et aussi les éoliennes ainsi que beaucoup d'autres applications industrielles. Le couplage élastique entre la machine électrique et le mécanisme entraîné, causé par l'élasticité de l'arbre et des engrenages, est souvent inévitable et peut causer des vibrations indésirables qui affectent la performance dynamique de l'entraînement; d'où il se présente l'intérêt d'une analyse détaillée de tels systèmes.

En utilisant un modèle à une masse qui suppose que les liaisons entre les différents éléments du mécanisme sont entièrement rigides, nous négligeons les propriétés oscillatoires de ce mécanisme. Pour tenir compte de la réalité de fonctionnement caractérisé par une élasticité entre les éléments du système mécanique, une modélisation multi-masses reflétant la complexité du mécanisme entraîné est indispensable pour l'étude de nombreux systèmes industriels. [1]

3-1-Pour quoi choisissant le moteur à courant continu : [2]

Beaucoup d'applications nécessitent un couple de démarrage élevé. Or, le moteur à courant continu, par nature, possède une caractéristique couple/vitesse de pente importante. ce qui permet de vaincre un couple résistant élevé, et d'absorber facilement les à coups de charge ; la vitesse du moteur s'adapte à sa charge. D'autre part, la miniaturisation recherchée par les concepteurs trouve dans le moteur à courant continu une solution idéale, puisque présentant un rendement élevé, en comparaison aux autres technologies.

3-2-Définition de moteur à courant continu :

Ce moteur se caractérise par des lois de fonctionnement linéaires. Elles rendent l'exploitation de ses caractéristiques plus faciles d'emploi que celles des moteurs synchrones ou asynchrones.

3-2-1-Constitution d'un moteur à courant continu :

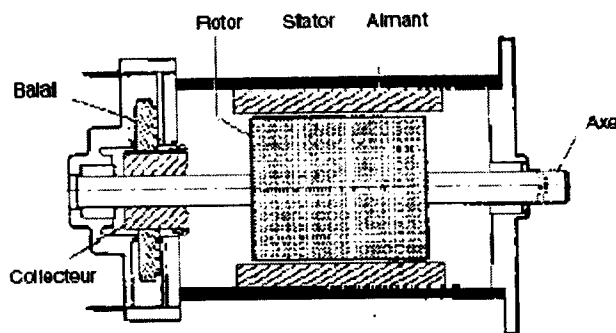


Figure 3-1 Constitution d'un moteur à courant continu

Le stator est formé d'une carcasse métallique et de un ou plusieurs aimants créant un champ magnétique à l'intérieur du stator. A l'arrière du stator, se trouve la partie porte balais et les balais assurant les contacts électriques avec le rotor.

Le rotor est lui-même constitué d'une carcasse métallique portant des bobines reliées entre elles au niveau du collecteur.

L'ensemble collecteur-balais permet de sélectionner l'ensemble des bobines qui seront parcourues par un sens de courant et l'ensemble des bobines qui seront parcourues par un courant en sens contraire.

3-2-2-Principe de fonctionnement : [3]

Quel que soit la complexité du bobinage, une fois alimenté, on peut le représenter sous la forme d'un cylindre ferromagnétique comportant à sa périphérie un solénoïde.

Le fil de ce solénoïde est constitué du faisceau de fil se trouvant dans chaque encoche du rotor. Le rotor se comporte alors comme un électroaimant dont l'induction magnétique a pour direction l'axe séparant les fils du solénoïde selon le sens du courant qui les parcourt.

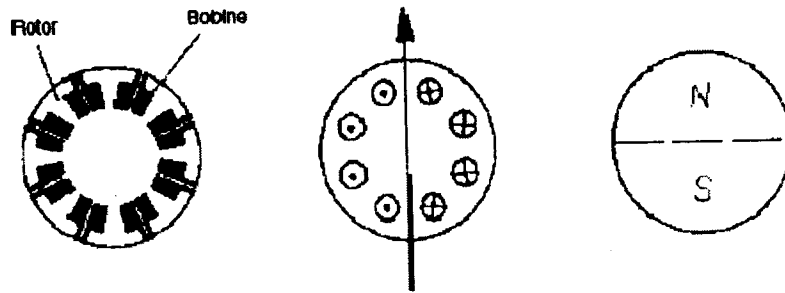


Figure 3-2 Principe de fonctionnement

Le moteur est donc constitué d'aimants fixes, d'un aimant mobile (le rotor) et d'une carcasse métallique pour concentrer le flux.

Par attraction des pôles contraires et répulsion des pôles de même nature, un couple s'applique sur le rotor et le fait tourner. Ce couple est maximum lorsque l'axe des pôles du rotor est perpendiculaire à l'axe des pôles du stator.

Dès que le rotor se met à tourner, les balais changent de lames de collecteur.

Les bobines sont alimentées différemment, de telle sorte que l'axe des nouveaux pôles du rotor soit toujours perpendiculaire à celui du stator.

Par le jeu du collecteur, le rotor ne cesse de tourner quelle que soit sa position. L'ondulation du couple résultant diminue avec l'augmentation du nombre de lames du collecteur.

En permutant les fils d'alimentation du moteur, le courant dans les bobines du rotor et donc les pôles nord et sud sont inversés. Le couple qui s'applique est alors de sens contraire au précédent. Le moteur change de sens de rotation. Par nature, le moteur à courant continu est un moteur à deux sens de rotation.

3-3 - Modèle théorique de la machine à courant continu : [4],[5]

Le modèle de la MCC à excitation indépendante est déduit de la machine biphasée [4] en supposant que les variables sont exprimées dans le référentiel α - β relié au stator (inducteur de MCC), les équations de la MCC sont :

$$U_a = (R_e + sL_e)I_e \quad (3-1)$$

$$U_a = (R_a + sL_a)I_a + PL_{ea}I_e\Omega \quad (3-2)$$

$$C_e = PL_{ea}I_eI_a \quad (3-3)$$

où :

U_e : Tension d'excitation ;

I_e : Courant d'excitation ;

U_a : Tension aux bornes de l'induit ;

I_a : Courant d'induit ;

R_e : Résistance du circuit d'excitation ;

R_a : Résistance du circuit d'induit ;

L_e : Inductance du circuit d'excitation ;

L_a : Inductance du circuit d'induit ;

L_{ea} : Inductance mutuelle induit inducteur;

P : Nombre de paires de pôles;

C_e : Couple électromagnétique.

Ω : Vitesse angulaire du rotor.

3-4 - Modèle théorique du système mécanique multi-masses :

Les équations décrivant le système mécanique sont déduites du modèle d'étude du mouvement de Lagrange suivant [5] :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} + \frac{dW_d}{dq_i} &= Q_i \\ L &= W_c - W_p \end{aligned} \right\} \quad (3,4)$$

avec :

W_c : est l'énergie cinétique du système.

W_p : est l'énergie potentielle du système.

W_d : est l'énergie dissipée.

Ou encore :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dW_c}{dq} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{dW_p}{dq_i} \right) - \frac{dW_c}{dq_i} + \frac{dW_p}{dq_i} + \frac{dW_d}{dq_i} = Q_i \quad (3,5)$$

Pour un mouvement de rotation nous avons :

$$q_i = \theta_i ; \dot{q}_i = \Omega_i ; Q_i = C_i$$

θ_i, Ω_i : sont respectivement les déplacement et la vitesse angulaires de l'élément i ,

C_i : est le couple appliqué à l'élément i .

Donc l'équation de Lagrange généralisée devient (pour chaque élément du système) :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dW_c}{d\Omega_i} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{dW_p}{d\theta_i} \right) - \frac{dW_c}{d\theta_i} + \frac{dW_p}{d\theta_i} + \frac{dW_d}{d\theta_i} = C_i \quad (3,6)$$

Les énergies cinétique, potentielle et dissipée d'un système mécanique à (n) masses en mouvement de rotation ont pour expressions :

$$W_c = \sum_{i=1}^n \frac{J_i \Omega_i^2}{2} ; W_p = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{K_{i,i+1} (\theta_i - \theta_{i+1})^2}{2} ; W_d = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\beta_{i,i+1} (\Omega_i - \Omega_{i+1})^2}{2}$$

En combinant ces dernières expressions avec l'équation de Lagrange nous obtenons notre modèle mécanique à (n) masses qui est décrit par le système d'équations suivant [5]:

$$\left. \begin{aligned}
 C_e - \frac{K_{12}}{S}(\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} &= J_1 S \Omega_1 \\
 \frac{K_{12}}{S}(\Omega_1 - \Omega_2) - \frac{K_{23}}{S}(\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{12}(\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23}(\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} &= J_2 S \Omega_2 \\
 \dots\dots\dots \\
 \dots\dots\dots \\
 \frac{K_{n-2,n-1}}{S}(\Omega_{n-2} - \Omega_{n-1}) - \frac{K_{n-1,n}}{S}(\Omega_{n-1} - \Omega_n) + \beta_{n-2,n-1}(\Omega_{n-2} - \Omega_{n-1}) \\
 - \beta_{n-1,n}(\Omega_{n-1} - \Omega_n) - C_{rn-1} &= J_{n-1} S \Omega_{n-1} \\
 \frac{K_{n-1,n}}{S}(\Omega_{n-1} - \Omega_n) + \beta_{n-1,n}(\Omega_{n-1} - \Omega_n) - C_{rn} &= J_n S \Omega_n
 \end{aligned} \right\} (3,7)$$

où :

- J_i : Moment d'inertie de la $i^{ème}$ masse ;
- Ω_i : Vitesse angulaire de la $i^{ème}$ masse ;
- C_{ri} : Couple résistant appliqué à la $i^{ème}$ masse ;
- $K_{i,i+1}$: Coefficient de rigidité entre les masses i et $i+1$;
- $\beta_{i,i+1}$: Coefficient d'amortissement entre les masses i et $i+1$;

3-5- Outils de simulation MATLAB/SIMULINK : [6]

3-5-1- Matlab :

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc. Il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif, l'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (programmes) comme avec d'autres langages. L'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions

pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fonctions fournissent à MATLAB un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement MATLAB peut facilement être étendu. Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime partie du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. MATLAB est une abréviation de MATrix LABoratory. Écrit à l'origine, en Fortran, par Cleve Moler, MATLAB était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK. La version actuelle est écrite en C. Sa disponibilité est assurée sur plusieurs plates-formes : Sun, Bull, HP, IBM, Compatibles PC, Macintosh, et plusieurs machines parallèles. MATLAB est conforté par une multitude de boîtes à outils (toolboxes) spécifiques à des domaines variés. Un autre atout de MATLAB, est sa portabilité; la même portion de code peut être utilisée sur différentes plates-formes sans la moindre modification.

3-5-2- Simulink :

SIMULINKTM est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires; une extension de MATLABTM, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue alors particulièrement bien les contre-réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. Les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation.

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est à dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement. SIMULINK est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (librairies) classés par catégories. Les principales librairies sont montrées dans le tableau 1.

Librairie	Contenu
Sources	Différents types de signaux d'entrée
Sinks	Appareils virtuels de visualisation
Continuous	Systèmes et opérateurs continus
Discrete	Blocs représentant les systèmes discrets
Math	Opérateurs mathématiques
Functions & Tables	Fonctions et tables de valeurs
Nonlinear	Systèmes et opérateurs non linéaires
Signals & Systems	Blocs de connexion et sous-systèmes

Tableau 3-1 principales librairies

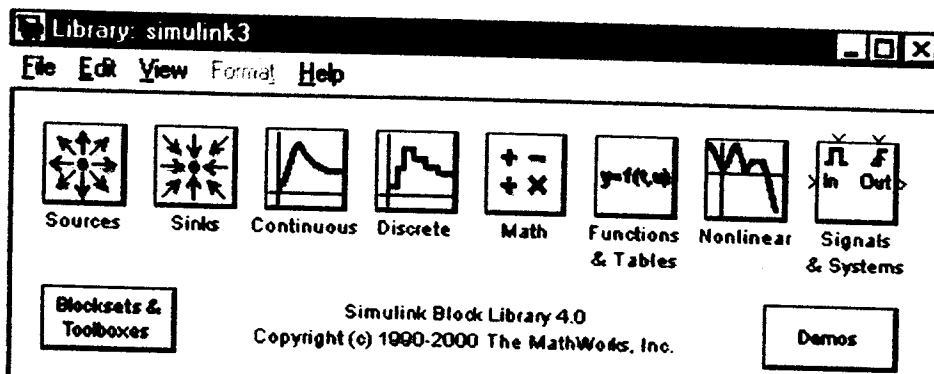


Figure 3-3 Librairie SIMULINK

3-6- Données numériques d'un entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu :

Nous allons considérer, dans une première application d'entraînement multi-masses [7], un moteur à courant continu à excitation indépendante, de puissance nominale de $2kW$ avec un courant d'induit nominal de $20 A$ et une vitesse angulaire égale à 230 rad/s qui fonctionne tensions constantes $U_a = 100V$ et $U_e = 5V$.

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

Les paramètres électriques et mécaniques de l'entraînement du moteur à courant continu sont donnés par :

$R_a=0.18\text{Ohm}$, $R_e=3.5\text{Ohm}$, $L_{ea}=0.1\text{H}$, $L_a=0.0062\text{H}$ et $L_e=0.095\text{H}$, $J_t=0.04\text{kg.m}^2$,

$\beta_{i, i+1}=0.007\text{Nms/rad}$, $k_{i, i+1}=20\text{Nm/rad}$ ($i = 1, 2$) et $P=3$;

Et les valeurs de couple de charge minimale et maximale sont respectivement :

$C_{r\min}=\sum C_{ri}=0\text{N.m}$; et $C_{r\max}=\sum C_{ri}=10\text{N.m}$;

La contribution d'inertie du moteur dans l'inertie totale du système dépend du type d'entraînement. Nous attribuons initialement à la première masse (moteur) 50% de l'inertie totale, à la deuxième masse 25%, et à la troisième masse 25% de l'inertie totale, par ailleurs d'autres cas seront également étudiés pour analyser l'effet de la variation du moment d'inertie sur la réponse du système.

3-7-Simulation du modèle de l'entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu sous Matlab-Simulink :

Le modèle tel que développé sous Matlab-Simulink est présenté à la figure 3-4 ci-dessous.

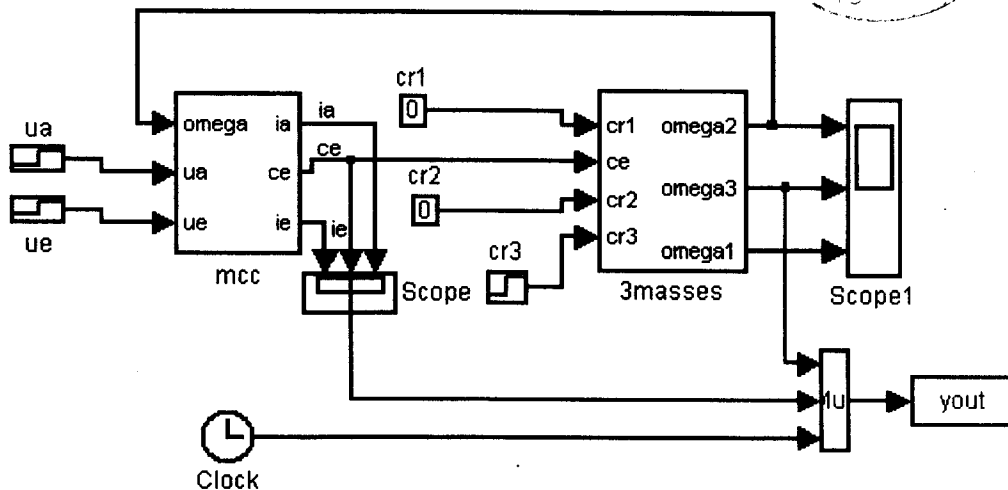


Figure 3-4 Modèle de simulation développé sous Matlab-Simulink de l'entraînement 3-masses à base de moteur à courant continu

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

Tout en utilisant les données numériques présentées au paragraphe 3-6, nous considérons un couple de charge (C_{r3}) nul, quant aux couples résistants C_{r1} et C_{r2} dus aux frottements, nous les considérons négligeables donc nuls tout le long de l'étude.

D'abord, les résultats de simulation présentés à la figure 3-5 mettent en valeur la situation de démarrage du moteur à courant continu. Le courant inducteur présente une réponse du premier ordre de constante de temps $T_e = L_e/R_e$, par ailleurs le courant induit et le couple électromagnétique sont nature oscillatoire amortie lié à la structure multi-masses du système mécanique, présentant un pic au démarrage.

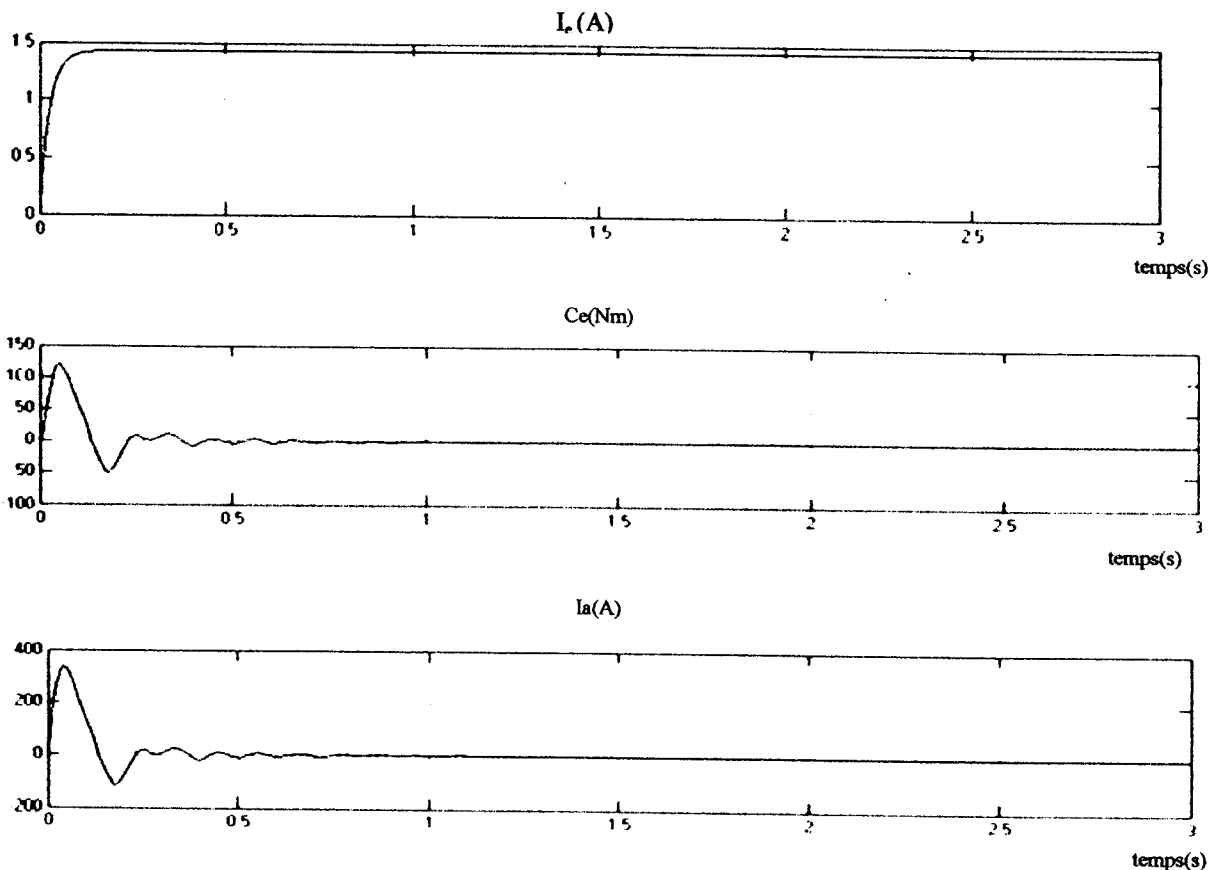


Figure 3-5 Courbes au démarrage, du couple électromagnétique, du courant d'induit, du courant d'excitation de moteur à courant continu

3-8-Modèle théorique de la turbine à vent :

La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser, cependant des modèles mathématiques simples sont souvent utilisés.

L'équation mathématique suivante représente la relation entre la vitesse du vent et la puissance mécanique extraite [1]

$$P = \frac{1}{2} \rho S C_p V^3 \quad \text{avec : } S = \pi R^2 \quad (3,8)$$

Le couple exercé par le vent sur la turbine (ou le couple mécanique à la sortie de la turbine) est défini par :

$$T_m = \frac{P}{\Omega} \quad (3,9)$$

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient C_p et différentes expressions ont été proposées. Nous présentons ci-dessous quatre formes déjà utilisées dans différents articles scientifiques : [8]

$$i) C_p = \frac{1}{2} (\gamma - 0.022a^2 - 5.6) e^{-1.13\gamma} ;$$

Où ; $\gamma = \left(\frac{9}{4}\right) \frac{V}{\Omega}$, γ : est le rapport de vitesse périphérique

$$ii) C_p = (0.44 - 0.0167a) \sin \left[\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3a} \right] - 0.00184(\lambda - 3)a$$

$$iii) C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda} - 0.4a - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda}} \text{ et}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08a} - \frac{0.035}{a^3 + 1}$$

$$iv) C_p = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda} - 0.58a - 0.002a^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda}}$$

(3,10)

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

$$\text{et : } \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda - 0.02a} - \frac{0.003}{a^3 + 1}$$

où : $\lambda = \frac{R\Omega}{v}$; λ est le rapport de la vitesse périphérique

Généralement les articles présentent le coefficient C_p par des graphiques.

Le coefficient C_p est différent d'une turbine à l'autre, en effet les courbes du coefficient de puissance des turbines à vent commerciales sont fournies dans la documentation produite par le fabricant et peuvent être utilisées pour définir une approximation mathématique de la courbe de puissance à l'aide de méthodes d'optimisation numériques.

Cependant, il est jugé souvent non nécessaires de développer différentes approximations de ce coefficient pour tous les types des turbines à vent, puisque les différences entre les courbes des turbines à vent sont généralement faibles et peuvent être souvent négligées dans de nombreuses applications.

Dans ce sens, nous précisons que les courbes de puissance des éoliennes rapides et auxquelles nous allons nous intéresser dans notre application peuvent être approximées par la courbe de la figure (3-6) [9]

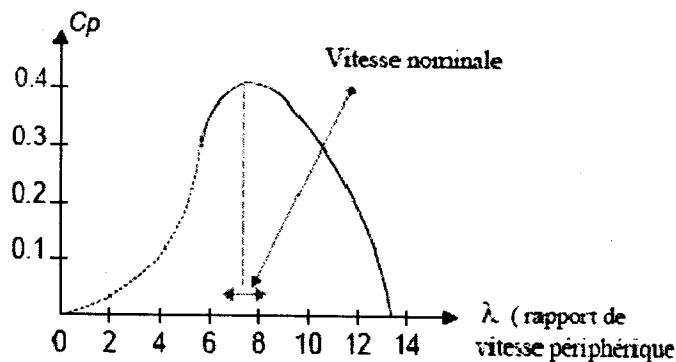


Figure 3-6 Coefficient de puissance des turbines à vent rapides

Nous aurions pu exploiter la courbe ci-dessus dans le cadre de l'application d'éolienne qui suivra, mais nous disposons également de la courbe de puissance spécifique de l'éolien objet de notre étude et comme nous allons constater, cette courbe est identifiable à la courbe générale présentée à la figure (3-6).

3-9- Description et données numériques d'un modèle 2-masses d'une éolienne à base de la MCC:

Les turbines à vent utilisées pour la génération de l'électricité sont généralement des machines rapides à deux ou trois pales.

Trois types des générateurs sont généralement utilisés : le générateur à courant continu, l'alternateur (générateur synchrone) et le générateur à induction (générateur asynchrone).

La figure (3-7) présente la structure globale du système de l'éolienne utilisé dans cette étude, elle consiste en une turbine à vent à trois pales, un système mécanique à deux masses et une machine à courant continu directement connectée au réseau.

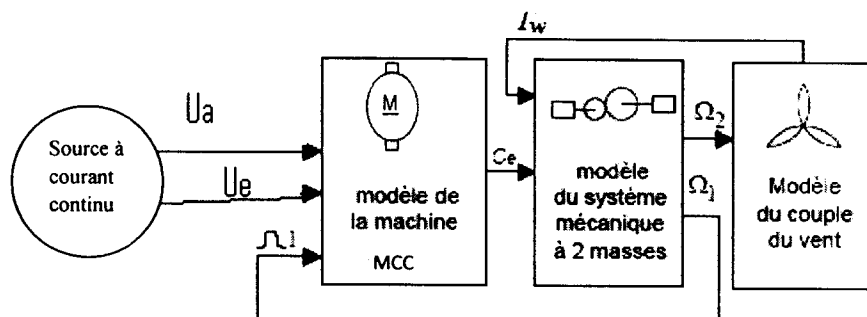


Figure 3-7 Structure du système de l'éolienne

Le modèle de la génératrice à courant continu est le même que celui utilisé précédemment . Les paramètres de tout le système sont fournis dans les tableaux (3-2). [10]

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

Données de la turbine à vent	
Puissance nominale	$P_n = 10 \text{ kW}$
Diamètre du rotor	$D = 7 \text{ m}$
Vitesse du rotor	$\Omega = 4.41 \text{ rad/s}$
Nombre de pales	3
Données admises	
Densité de l'air	$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Données de l'entraînement mécanique à deux masses	
Moment d'inertie de la turbine	$J_r = 5.71 \text{ kgm}^2$
Moment d'inertie du générateur	$J_g = 0.04 \text{ kgm}^2$
Coefficient de rigidité	$K_{1,2} = 20 \text{ Nm/rad}$
Coefficient d'amortissement	$\beta_{1,2} = 0.007 \text{ Nms/rad}$
Toutes les données sont référées à la plus haute vitesse (vitesse du rotor du générateur)	

Données de la génératrice à courant continu	
3 ϕ , 400-V, 50-Hz,	
Nombre de paires de pôles	$p = 3$
Résistance de l'induit	$R_a = 0,18 \text{ ohm}$
Résistance de l'inducteur	$R_e = 3.5 \text{ ohm}$
courant d'induit	$I_i = 20 \text{ A}$
Tension d'excitation	$U_e = 5 \text{ V}$
Tension aux bornes de l'induit	$U_a = 100 \text{ V}$
Inductance du circuit d'excitation	$L_e = 0.09 \text{ H}$
Inductance du circuit d'induit	$L_a = 0.0062 \text{ H}$
Inductance mutuelle	$L_{ea} = 0.1$

Tableau 3-2 : Les paramètres du système de l'éolienne

3-10 - Simulation du système de l'éolienne à base de la MCC sous Matlab-Simulink :

L'expression du coefficient de puissance C_p de notre éolienne peut être approchée par l'équation numérique suivante :

$$C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda} - 0.4a - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda}} \text{ et } \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08a} - \frac{0.035}{a^3 + 1}$$

et ce pour $a = 0$.

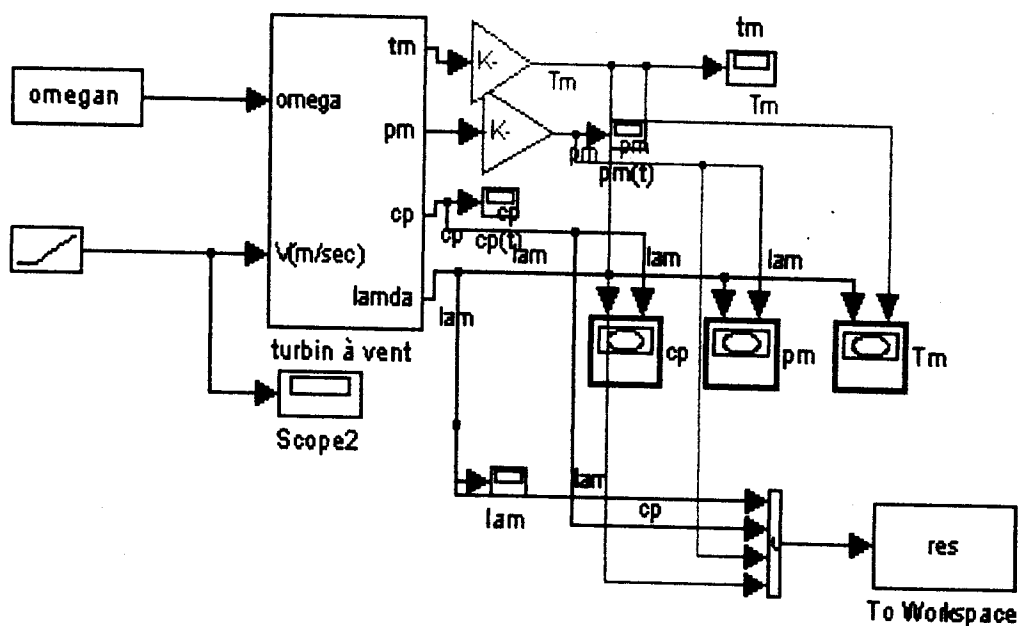


Figure 3-8 Modèle de la turbine à vent développé sous Matlab-Simulink

Nous allons analyser ce modèle considérant la variation de la vitesse du vent et que l'angle d'attaque des pales : $\alpha = 0^\circ$, la vitesse du rotor de la turbine est considérée constante : $\Omega \approx 4.41$ (rad / s). La figure (3-9) présente les courbes du couple, de la puissance ainsi que du coefficient de puissance de la turbine en fonction de λ qui est le rapport de vitesse périphérique.

Nous constatons que quand le rapport de vitesse périphérique λ augmente la puissance ainsi

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

que le couple et le coefficient de puissance à la sortie de la turbine augmentent jusqu'à une valeur maximal puis ils diminuent, cette diminution de ces courbes est faite à cause de système de sécurité de l'éolienne. Nous remarquons que le maximum de puissance extraite du vent correspond à $\lambda \approx 2.5$ et la valeur maximale du coefficient C_p correspond à $\lambda \approx 6$; si nous choisissons de travailler initialement entre ces deux valeurs, c'est à dire avec $\lambda = 5$, sachant que $\lambda = R.\Omega/V$ avec $R = 3.5m$ et $\Omega \approx 4.41 (rad / s)$, à la valeur $\lambda = 5$ correspondra une vitesse de vent $V \approx 3m/s$.

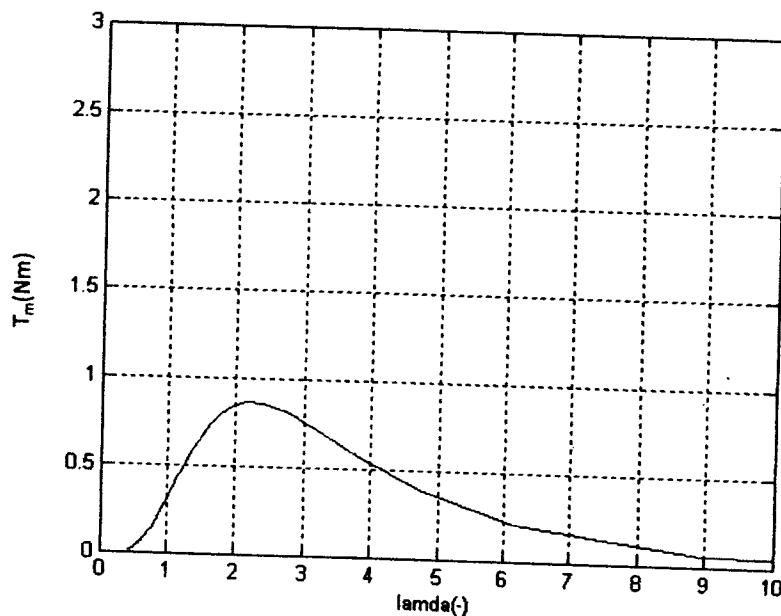


Figure (3-9) a- $T_m = f(\lambda)$

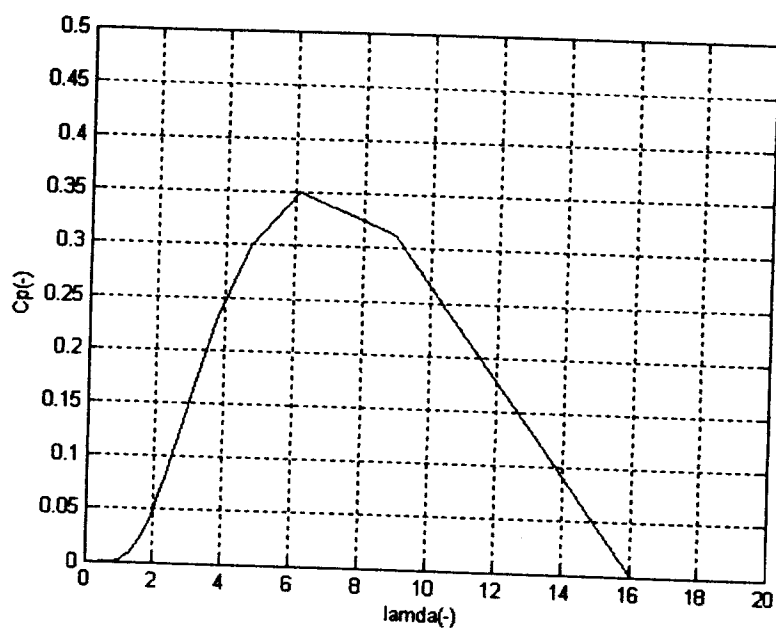


Figure (3-9) b- $C_p=f(\lambda)$

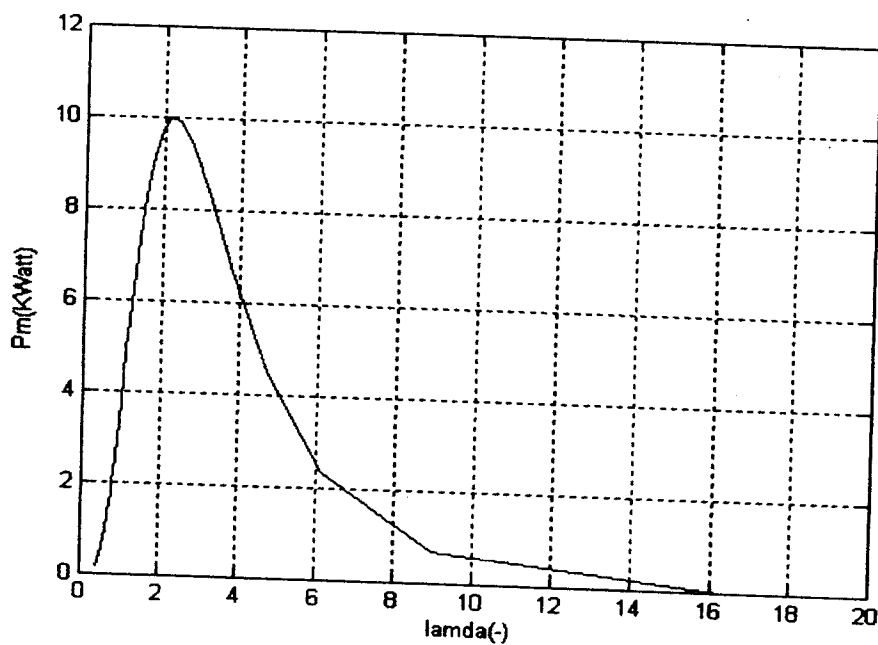


Figure (3-9) c- $P_m=f(\lambda)$

Figure 3-9 : Caractéristiques de la puissance et du couple à la sortie de la turbine, ainsi que du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse périphérique λ , pour $a=0^\circ$.

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

Le modèle de tout le système composé de la MCC, de la turbine à vent ainsi que du système mécanique à deux masses, tel que développé sous Matlab-Simulink est le suivant

(Figure 3-10) :

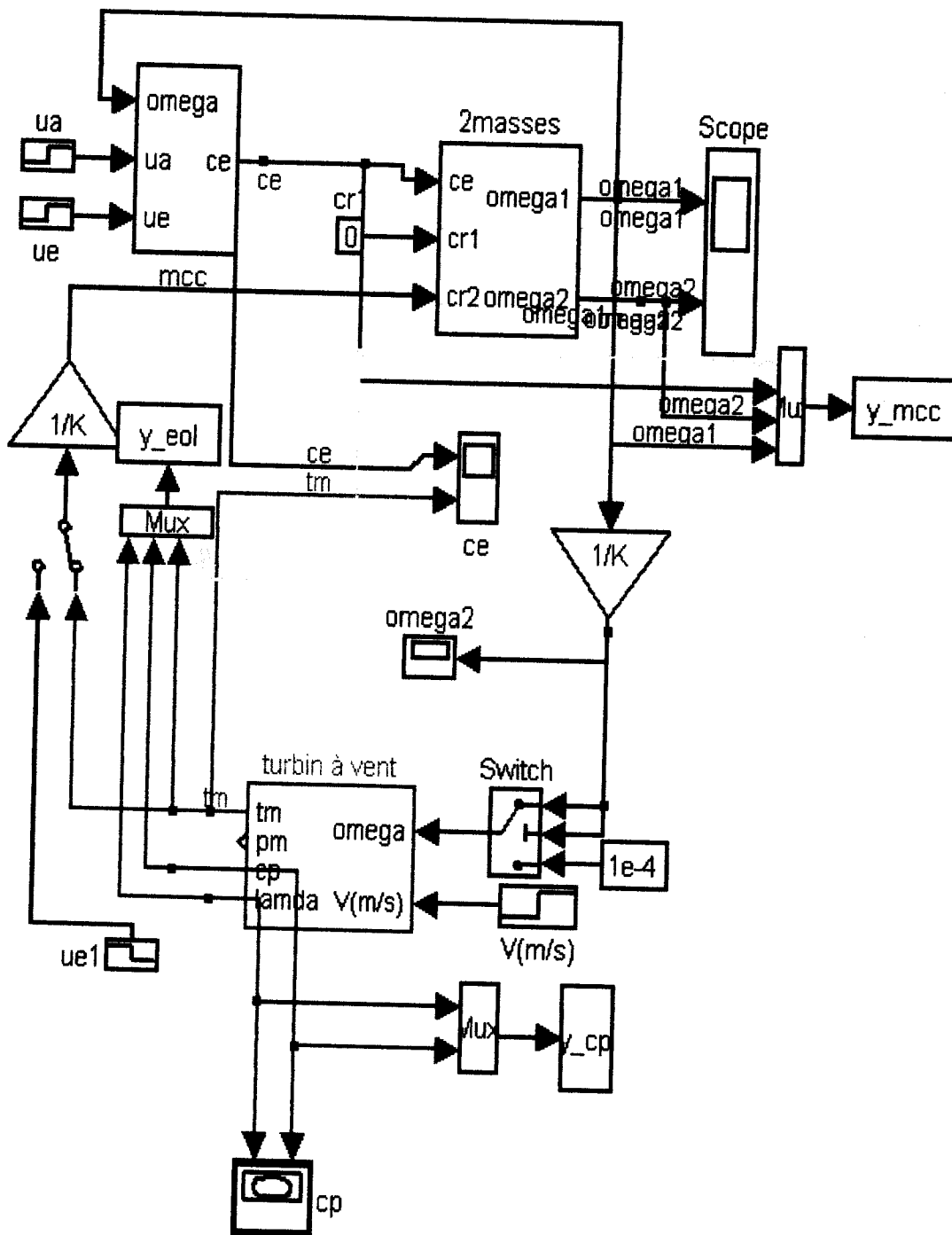


Figure 3-10 : Schéma de simulation développé sous Matlab-Simulink du système de l'éolienne composé de la génératrice à courant continu, de la turbine à vent et du système mécanique à deux masses.

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

Les courbes de simulation obtenues à l'aide du modèle de la figure (3-10) sont présentées ci-dessous, il est à préciser que nous avons diminué le pas de calcul pour minimiser le temps demandé par ces simulations.

Dans la figure (3-11) on remarque que le couple électromagnétique de la MCC (C_e) présente au démarrage un pic de 500Nm et après 0.7s, il tend vers le régime permanent à partir de -5Nm cette valeur est négative parce que la génératrice à courant continu fournit de l'énergie au système.

Le couple électromagnétique de l'éolienne présente un dynamique légèrement inférieure au (C_e) de la MCC qui peut dire que le temps de repense de l'éolien est inférieur à celui de la MCC.

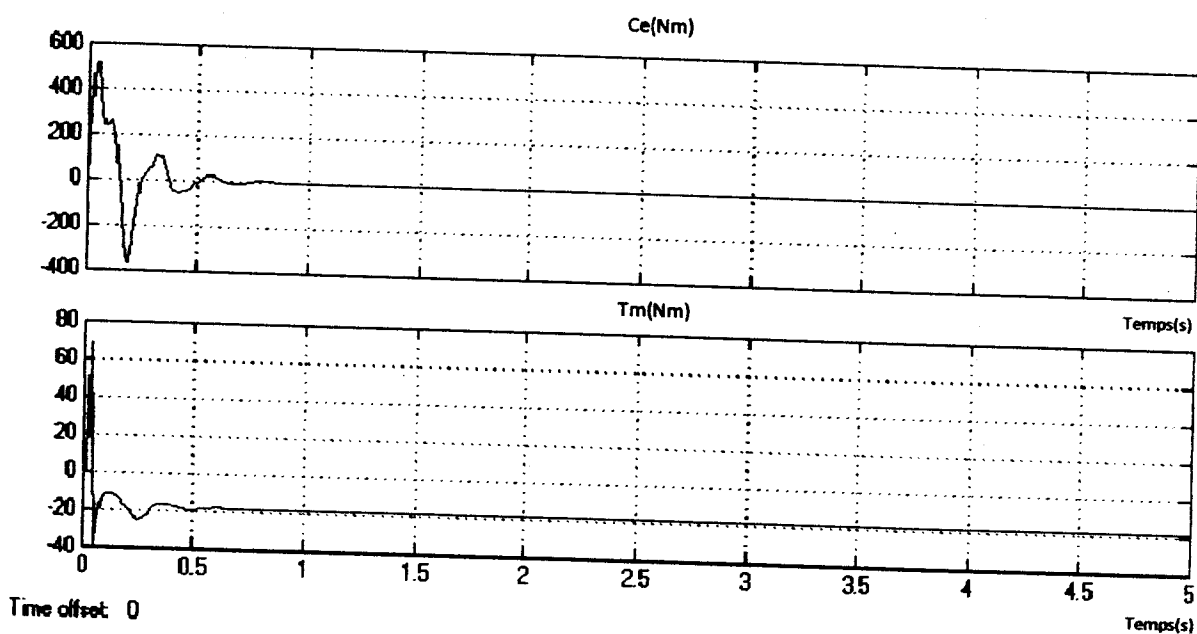


Figure 3-11 : Courbes du couple électromagnétique de la génératrice et de la turbine.

La figure 3-12 présente la variation des deux vitesses angulaires Ω_1 de la 1^{ère} masse et Ω_2 de la 2^{ème} masse nous remarquons qu'ont la même repense tel que chaque une présente en démarrage un pic de 1500rad/s puis elle tend vers le régime permanent à partir de $t=0.4$ s.

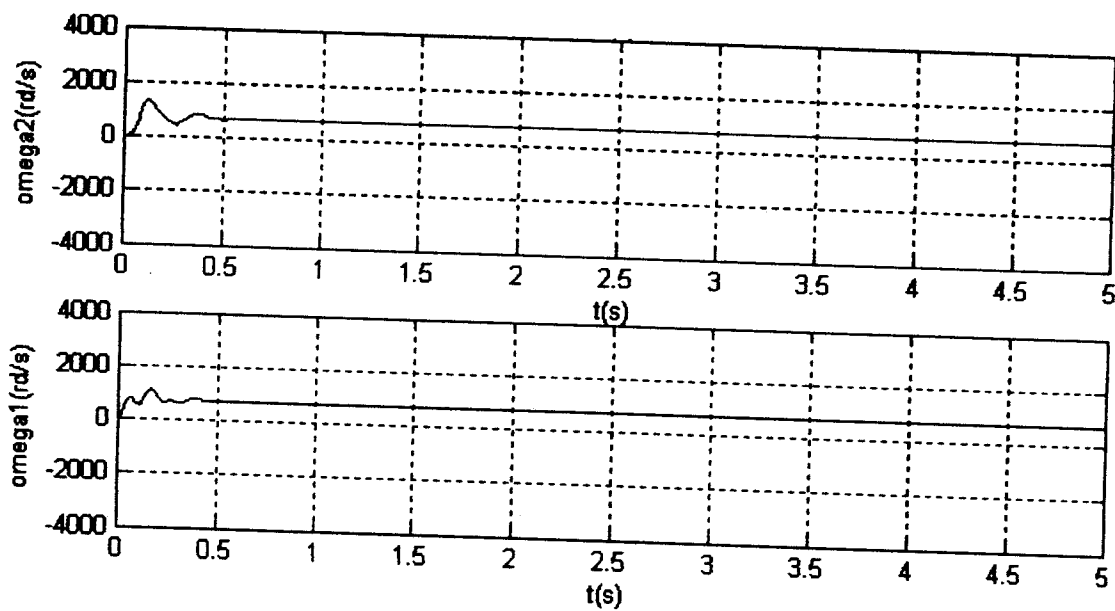


Figure 3-12: Courbes de la vitesse angulaire de la génératrice et de la turbine.

Dans la figure 3-13 nous représentons l'évolution du coefficient de puissance en fonction de la vitesse périphérique λ . La courbe monte depuis une vitesse $\lambda = 0.7$ jusqu'à $\lambda = 4.2$ puis elle descend. La valeur 4.2 correspond à un $C_p = 0.36$ qui est la valeur maximale de cet coefficient, on dit alors que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par cet aérogénérateur ne peut dépasser le 36% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde.

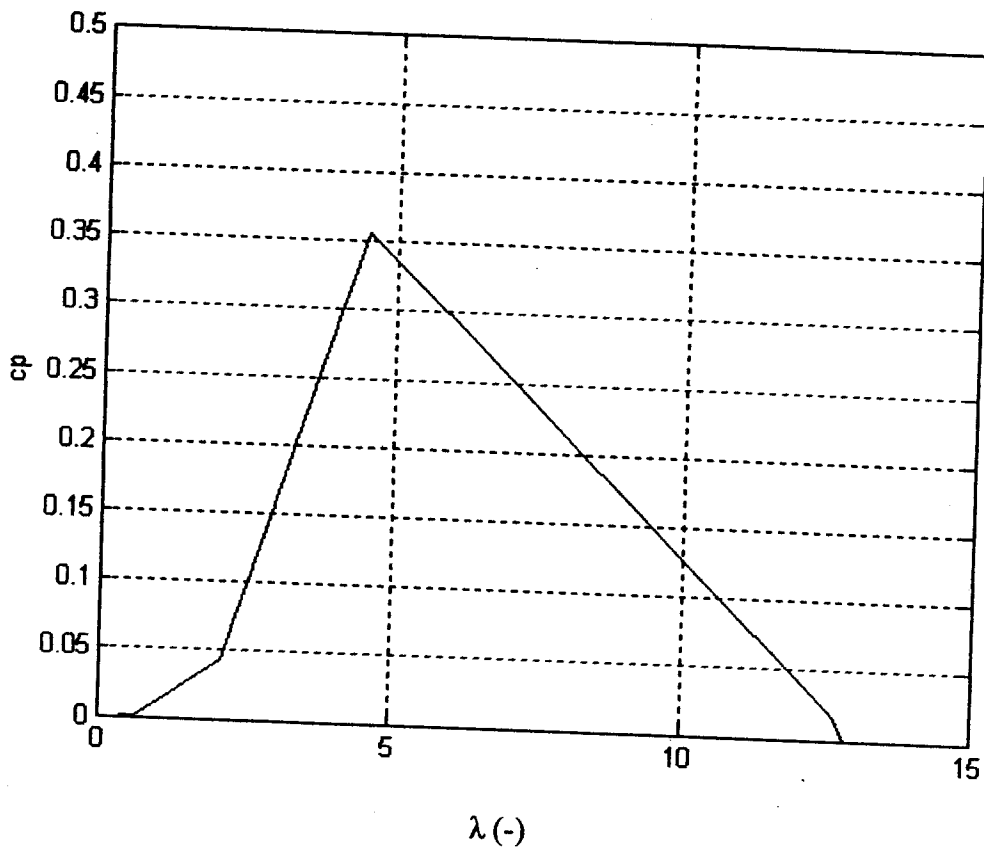


Figure 3-13 Caractéristiques du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse périphérique λ

La variation de coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse périphérique λ des trois sites étudiés dans ce travail (Tlemcen, Djelfa et Ghardaïa) est donnée dans les figures (3-14), (3-15) et (3,16).

Pour Tlemcen, on remarque qu'on a un maximum de $C_p=0.38$ à une vitesse $\lambda=8$,

Pour Djelfa, on remarque qu'on a un maximum de $C_p=0.44$ à une vitesse $\lambda=6.5$,

Pour Ghardaïa, on remarque qu'on a un maximum de $C_p=0.42$ à une vitesse $\lambda=6$,

Alors, le meilleur rendement de notre aérogénérateur est présenté au site de Ghardaïa (44%).

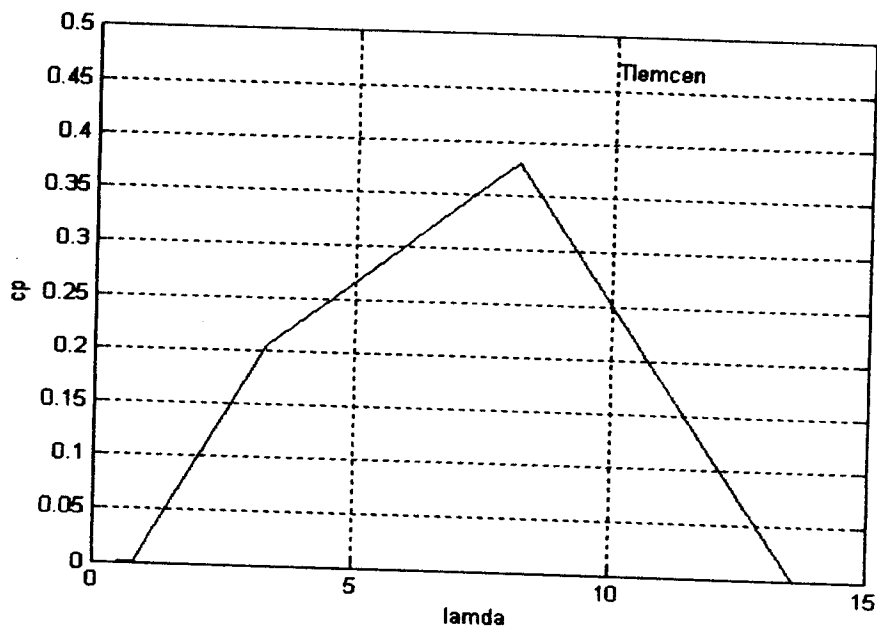


Figure 3-14 Caractéristiques du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse périphérique λ

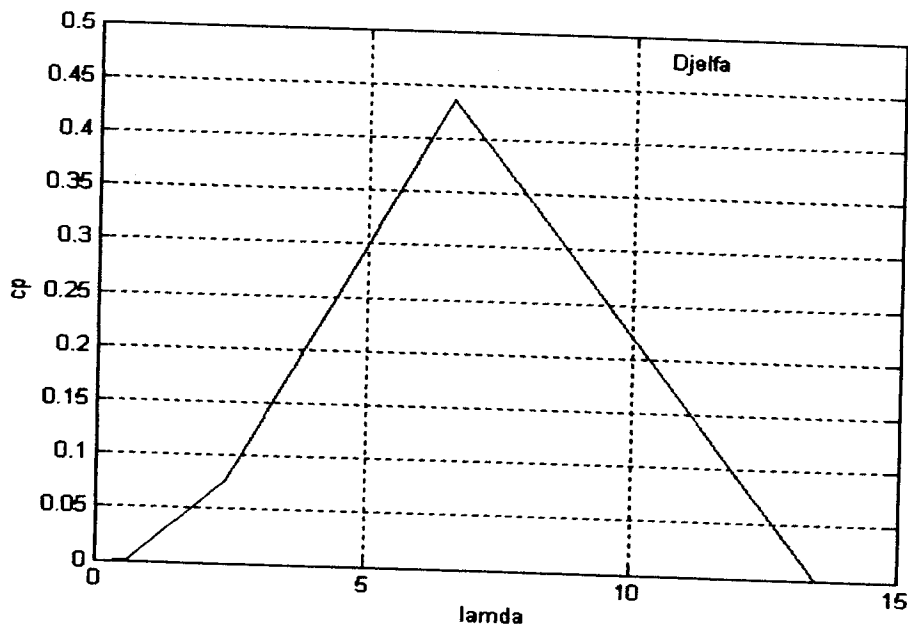


Figure 3-15 Caractéristiques du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse périphérique λ

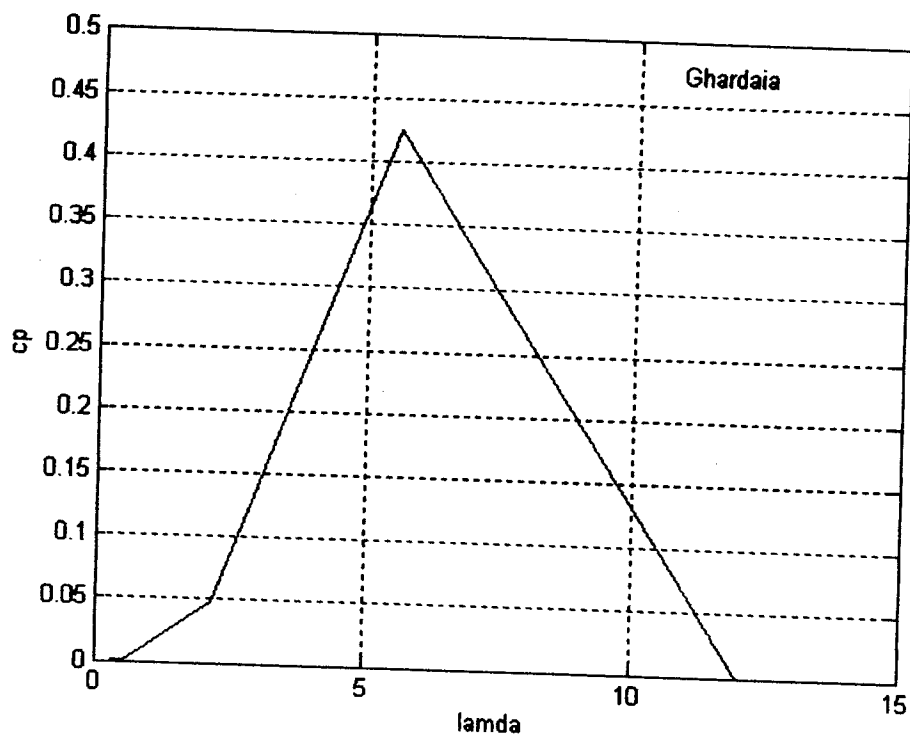


Figure 3-16 Caractéristiques du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse périphérique λ

Conclusion :

Dans ce chapitre on a dimensionné l'aérogénérateur que l'on souhaite placer sur les sites de Tlemcen, Ghardaïa et Djelfa, pour alimenter les localités en énergie électrique.

Des simulations ont été faites à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK. On a commencé par la modélisation de la génératrice, en suite le modèle de la turbine à vent et on termine par l'association des deux derniers.

D'après l'analyse faite sur les résultats, on a conclue que notre aérogénérateur a un rendement assez fiable pour les trois sites étudiés, mais la comparaison entre ces résultats

Chapitre 3 : Spécifications et Dimensionnements

montre que le meilleur site pour l'implantation de cet aérogénérateur c'est Djelfa avec un rendement de 44%, c'est parce que c'est un site relativement plate qui situe dans une zone semi arides à savoir dans la partie centrale des hauts plateaux algériens.

Bibliographie

- [1] Sanae Rechka, Gilles Roy, Sébastien Denetiere et Jean Mahseredjian, « Modélisation de systèmes électromécaniques multi-masses à base de machines asynchrones, à l'aide des outils Matlabs et EMTP, avec application aux éoliennes », Département de Génie Électrique Section Énergie électrique, Juillet 2004
- [2] Crouzet, « Quelques notions sur les moteurs à courant continu », IEEE (2006)
- [3] R. Mérat et R. Moreau, « Physique Appliquée, terminale électrotechnique », édition Nathan technique, 1994.
- [4] Mamadou Lamine Doumbia, « Comparative study of multi-mass models of electrical drives with asynchronous motors », Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de philosophiae doctor (PhD) en génie électrique, Ecole polytechnique de Montréal, Mai 2000.
- [5] M.L. Doumbia, G. Roy, V. Rajagopalan and V. Missurenko, « Comparative study of multi-mass models of electrical drives with asynchronous motors », Can. J. Elect. & comp. Eng., Vol. 23, No. 3, 1998.
- [6] Mamadou Lamine Doumbia, Abdoulaye Traoré, « Modélisation et Simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide de logiciel MATLAB/ », Sciences de l'ingénieur (Génie électrique)
- [7] Ezzeldin S. Abdin, and Wilson Xu, « Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 1, March 2000, pp.91-96.
- [8] J.G. Sloopweg, S.W.H. de Haan, H. Polinder, and W.L. Kling, « General Model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations », IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, February 2003, pp.144-151.
- [9] Désiré Le Gouirières, « Wind power plants, theory and design », Pergamon Press, First edition 1982.
- [10] Catalogue des fabricants d'aérogénérateurs de petite et moyenne puissance Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEM) Version du 12 juillet 2002.

*CONCLUSION
GENERALE*

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire de magister s'est porté sur une contribution à l'étude d'une station éolienne pour la production d'électricité pour application à quelques sites algériens qui sont : **Tlemcen, Ghardaïa et Djelfa.**

Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de l'éolien est présenté dans le premier chapitre. Les avantages et les inconvénients que présente l'énergie éolienne ont été évoqués au cours de cette étude.

Une modélisation des différents composants de système énergétique envisagé a été réalisée avec soin. Pour ce fait, nous avons utilisé la méthode de modélisation multimasse ; c'est une méthode qui reflète la complexité du mécanisme entraîné qui est indispensable pour l'étude de nombreux systèmes industriels en tenant compte de la réalité de fonctionnement caractérisé par une élasticité entre les éléments du système mécanique. La représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires est faite par une simulation à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK. Cette simulation a mis en évidence la structure du système et permis de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes du système.

Enfin, nous concluons que notre modèle proposé d'aérogénérateur a un rendement assez fiable pour les trois sites étudiés. La comparaison entre les trois sites a montré que le meilleur site pour l'implantation de cet aérogénérateur est le site de Djelfa avec un rendement de 44%.

En outre, nos résultats ont montré bien que le site de Ghardaïa présente un potentiel énergétique plus fiable que les deux autres sites : Tlemcen et Djelfa qui offrent un potentiel énergétique éolien assez faible, et ne peuvent être rentable que pour des systèmes de petite puissance

Conclusion générale

Les principales perspectives de recherche qui apparaissent à l'issue de ce mémoire de magister concernent l'amélioration du travail, à travers une thèse de doctorat, pour adapter nos modèles de simulation, pour qu'ils puissent être utilisés pour d'autres sites.

ANNEXES

ANNEX A

Programme de puissance

clear all;
clc;

vd1=3;
vd2=1;
vd3=3;

vn1=8;
vn2=6;
vn3=8;

vc1=16;
vc2=12;
vc3=12;

pn1=2000
pn2=1000
pn3=1500

a1=-1161.16
b1=382.195
c1=1.62

a2=-193.194
b2=192.06
c2=1.13426

a3=-870.84
b3=286.63
c3=1.215

n1=200
n2=200
n3=200
n=700

m1=n1+n2
m2=n1+n2+n3
h1=vd1/n1
h2=(vn1-vd1)/n2
h3=(vc1-vn1)/n3

ANNEX A

```
h4=0.4
  h11=vd2/n1
  h21=(vn2-vd2)/n2
  h31=(vc2-vn2)/n3
  h12=vd3/n1
  h22=(vn3-vd3)/n2
  h32=(vc3-vn3)/n3

  for i=1:n1
    x1(i)=i*h1
    x2(i)=i*h11
    x3(i)=i*h12
    y1(i)=0.
    y2(i)=0.
    y3(i)=0.
  end

  for i=n1:m1
    x1(i)=vd1+h2*(i-n1)
    x2(i)=vd2+h21*(i-n1)
    x3(i)=vd3+h22*(i-n1)

    y1(i)=a1+b1*x1(i)+c1*(x1(i)^2)
    y2(i)=a2+b2*x2(i)+c2*(x2(i)^2)
    y3(i)=a3+b3*x3(i)+c3*(x3(i)^2)

  end

  for i=m1:m2
    x1(i)=vn1+(i-m1)*h3
    x2(i)=vn2+(i-m1)*h31
    x3(i)=vn3+(i-m1)*h32

    y1(i)=pn1
    y2(i)=pn2
    y3(i)=pn3

  end

  for i=m2:n
    x1(i)=vc1+(i-m2)*h4
    x2(i)=vc2+(i-m2)*h4
    x3(i)=vc3+(i-m2)*h4

    y1(i)=0.
    y2(i)=0.
    y3(i)=0.

  end

end
```

ANNEX A

```
plot (x1,y1,'r')
hold on
plot (x2,y2,'g')
hold on
plot (x3,y3,'b')
legend ('GHARDAIA','TLEMCEN','DJELFA')
xlabel ('la Vitesse du vent (m/s)')
ylabel ('la puissance fournie par aerogenerateur en Watt')
grid on
```

ANNEX B

Etapas suivies dans le calcul des masses

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} + \frac{dW_d}{dq_i} = Q_i$$

$$L = W_c - W_p$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dW_c}{dq_i} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{dW_p}{dq_i} \right) - \frac{dW_c}{dq_i} + \frac{dW_p}{dq_i} + \frac{dW_d}{dq_i} = Q_i$$

$$q_i = \theta_i ; \dot{q}_i = \Omega_i ; Q_i = C_i$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dW_c}{d\Omega_i} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{dW_p}{d\Omega_i} \right) - \frac{dW_c}{d\theta_i} + \frac{dW_p}{d\theta_i} + \frac{dW_d}{d\Omega_i} = C_i$$

La première masse :

$$W_{c1} = \frac{1}{2} J_1 \Omega_1^2$$

$$W_{p1} = \frac{1}{2} K_{12} (\theta_1 - \theta_2)^2$$

$$W_{d1} = \frac{1}{2} \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2)^2$$

$$\frac{dl}{d\Omega_1} = \frac{d}{d\Omega_1} (W_{c1} - W_{p1})$$

$$= \frac{d}{d\Omega_1} \left(\frac{1}{2} J_1 \Omega_1^2 - \frac{1}{2} K_{12} (\theta_1 - \theta_2)^2 \right)$$

$$\frac{dl}{d\Omega_1} = J_1 \Omega_1$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dl}{d\Omega_1} \right) = \frac{d}{dt} J_1 \Omega_1$$

$$= J_1 S \Omega_1$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_i} \right) = J_1 S \Omega_1$$

$$\frac{dL}{dq_i} = \frac{d}{d\theta_1} \left(\frac{1}{2} J_1 \Omega_1^2 - \frac{1}{2} K_{12} (\theta_1 - \theta_2)^2 \right)$$

$$= -K_{12} (\theta_1 - \theta_2) = -\frac{K_{12}}{S} (\Omega_1 - \Omega_2) = \frac{dL}{d\theta_1}$$

$$\frac{dL}{d\theta_1} = -\frac{K_{12}}{S} (\Omega_1 - \Omega_2)$$

$$\frac{dW_d}{dq_i} = \frac{dW_d}{d\Omega_1} = \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2)$$

$$Q_i = C_e - C_{r1}$$

$$C_e - \frac{K_{12}}{S} (\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r1} = J_1 S \Omega_1$$

$$C_e = \frac{K_{12}}{S} (\Omega_1 - \Omega_2) + \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2)$$

La 2ème masse :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dl}{d\Omega_2} \right) = J_2 S \Omega_2$$

$$\frac{dL}{d\theta_2} = -\frac{K_{23}}{S (\Omega_2 - \Omega_3)}$$

$$\frac{dW_d}{d\Omega_2} = \beta_{23} (\Omega_2 - \Omega_3)$$

$$J_2 S \Omega_2 + \frac{K_{23}}{S} (\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{23} (\Omega_2 - \Omega_3) = \frac{K_{12}}{S} (\Omega_1 - \Omega_2) + \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - C_{r2}$$

$$\frac{K_{12}}{S} (\Omega_1 - \Omega_2) - \frac{K_{23}}{S} (\Omega_2 - \Omega_3) + \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) - \beta_{23} (\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} = J_2 S \Omega_2$$

$$\frac{K_{12}}{S} (\Omega_1 - \Omega_2) + \beta_{12} (\Omega_1 - \Omega_2) = C_e - C_{r1} - J_1 S \Omega_1$$

$$C_e - C_{r1} - J_1 S \Omega_1 - \frac{K_{23}}{S} (\Omega_2 - \Omega_3) - \beta_{23} (\Omega_2 - \Omega_3) - C_{r2} = J_2 S \Omega_2$$