



Impact du vent sur le Comportement électro- énergétique d'un système Hybride à base des énergies renouvelables

Tandjaoui Mohammed Nasser ^{*1}, Benachaïba Chellali ¹, Haddi Ali ²,

¹ Département de la Technologie, Université de Béchar, Algérie

² Laboratoire des technologies innovantes, ENSA de Tanger, Université Abdelmalek Essaadi, Maroc

* Corresponding author E-mail: tanjaoui_08@yahoo.fr

Abstract— Les exigences de développement durable conduisent à un accroissement de la production d'électricité d'origine renouvelable. Dans ce contexte, le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique, il constitue actuellement la ressource la plus compétitive et qu'il est vue comme étant déployée pour réduire les émissions globales. L'énergie éolienne est une bonne alternative aux énergies fossiles puisque son impact écologique est faible. Cette technologie se développe rapidement dont l'industrie des turbines éoliennes est la plus dynamique des industries de production de grand équipement pour la génération d'électricité. Mais l'argument écologique n'est pas le seul moteur de l'industrie éolienne. D'autant plus qu'on voit apparaître aujourd'hui de nombreux groupes anti éoliens qui opposent à l'argument écologique, des problèmes de santé publique (production d'infrason, bruit), ainsi que des arguments esthétiques et techniques.

Keywords— Eolien, Réseau Distribué, production décentralisée, Energie Renouvelable,

I. INTRODUCTION

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, engendre une forte pollution environnementale par rejets des gaz à effet de serre qui provoquent 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. La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète.

L'utilisation massive des énergies fossiles et fissiles, même si elle a envahi tout le champ de l'activité des hommes d'aujourd'hui, reste un épiphénomène à échelle de l'histoire humaine ; elle apparaît à travers deux petits pics, l'un au cours du 19^{ème} siècle avec le charbon et la découverte des machines à vapeur, l'autre au 20^{ème} siècle avec le pétrole, le gaz et le nucléaire.

Deux des défis majeurs pour notre siècle sont la lutte contre le changement climatique et la diversification des sources d'énergies que nous utilisons actuellement, pour servir les besoins des pauvres nations qui représentent plus des deux tiers de la population, le monde a besoin de se forger une nouvelle stratégie énergétique, qui pour respecter l'environnement global, devra d'abord reposer sur la sobriété et l'efficacité énergétique et inéluctablement utiliser les sources renouvelables qui ont indiscutablement un rôle important à tenir.

L'industrie électrique semble ainsi effectuer un retour en arrière, lorsque l'essentiel de l'énergie électrique était générée localement par de petits systèmes isolés en vue de son utilisation directe. Les anciens générateurs à vapeur utilisés pour fournir de la chaleur et de l'électricité ont trouvé leurs équivalents modernes sous la forme de micro-turbines, piles à combustible, moteurs à combustion interne et petites turbines à gaz. En plus de l'intérêt économique, d'autres arguments ont plaidé en faveur d'une transition vers les systèmes d'énergie décentralisés à petite échelle ; il s'agit notamment des retombées sur l'environnement, de la vulnérabilité des systèmes d'énergie centralisés en cas d'attentat et de la fiabilité de l'électricité [1].

En ce qui concerne les technologies de systèmes de production d'énergie décentralisés, il existe actuellement deux types de systèmes avec une forte implantation: les systèmes à base d'énergie renouvelable et les systèmes de cogénération. Ces systèmes, favorisés par les pouvoirs publics, sont devenus une réalité économiquement viable et s'imposent donc de fait. En ce qui concerne les énergies renouvelables, les dispositifs de conversion vont de quelques dizaines de watts (mini éolien ou photovoltaïque) jusqu'aux installations de quelques MWs (parc éoliens et certains champs photovoltaïques).

L'énergie éolienne est la seule qui soit à la fois peu coûteuse et facilement exploitable. Parallèlement à la production de l'énergie éolienne sur le réseau, le marché des centrales éoliennes de petites et moyennes puissances, destinées à l'alimentation des sites isolés, est très prometteur et en plein essor sur le marché de la production de l'énergie électrique. L'énergie éolienne est, parmi les énergies renouvelables, celle qui connaît la croissance la plus rapide au monde. Elle est presque universellement reconnue comme une



source d'énergie la plus prometteuse pour produire de l'électricité propre à court et à moyen termes. Et elle contribue à la préservation de l'environnement

Le vent est un élément dont l'étude s'avère très complexe, sa caractérisation est fonction de plusieurs paramètres tels que la mesure de la vitesse du vent et de sa direction, l'effet de la rugosité du sol, l'effet des obstacles, l'effet de la stabilité de l'atmosphère, etc. C'est pourquoi le vent, ce qui par nature pose évidemment problème.

II. DESCRIPTION DU SYSTEME ENERGETIQUE UTILISE DANS LA PRODUCTION D'ENERGIE EOLIENNE

Les éoliennes utilisent toujours une génératrice synchrone ou asynchrone à cage d'écurie comme générateur, où deux principaux procédés sont appliqués: - vitesse fixe, - vitesse variable.

Une éolienne est constituée par une tour (élément porteur). A son sommet, se trouve fixée la nacelle (élément actif). La nacelle est constituée d'un système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique avec sa commande. La figure 1 présente les composants de la chaîne électromécanique.

La tour de l'éolienne est de forme conique. Les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle et de commande, les appareillages de connexion au réseau de distribution basse tension, sont disposés à l'intérieur de la tour [3,6,12].

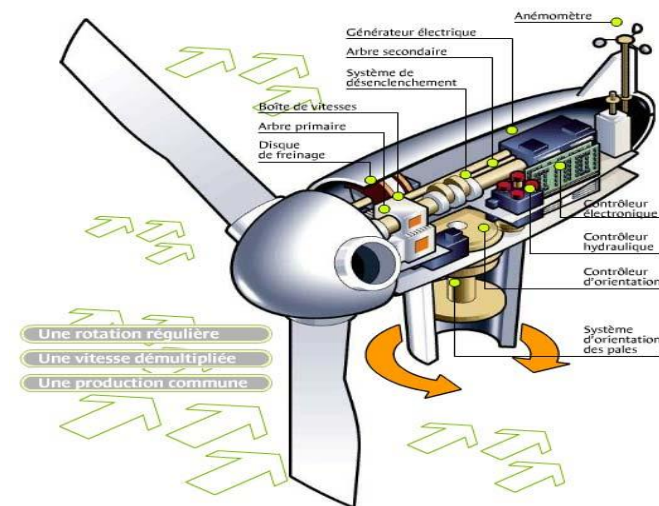


Fig. 1. Composants de la chaîne électromécanique

III. CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE EN ENERGIE ELECTRIQUE

Un développement durable des moyens de production d'énergies basés sur l'énergie éolienne, ne sera réalisable qu'avec une baisse du coût de réalisation, afin qu'ils puissent être intégré dans le marché de la production d'énergie [6]. La production d'énergie électrique par éolienne utilisant les

systèmes énergétiques à vitesse fixe ou variable. La production d'électricité à partir d'aérogénérateurs ou éolienne dans un site isolé, nécessite l'utilisation de l'ensemble machine électrique – convertisseur statique [3,14]. Nous savons que l'éolienne procure son énergie du vent, par conséquent, il existe une relation entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation, le couple et la puissance sur le rotor d'une éolienne.

La puissance mécanique qui peut être extraite du vent se détermine au moyen de l'expression suivante:

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (1)$$

ρ : Masse volumique de l'air (kg/m³),

S : Surface traversée par l'air (m²), $S = \pi \cdot R^2$,

R : Rayon du rotor de l'éolienne,

V : Vitesse du vent (m/s).

La puissance fournie par le rotor de l'éolienne est donnée par la relation suivante:

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

C_p : Coefficient dépendant de la forme du rotor et de la vitesse du vent. Ainsi il existe une relation linéaire entre la vitesse du vent et la vitesse angulaire du rotor [6].

$$k = \omega \cdot \frac{R}{V} \quad (3)$$

ω : Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne.

Le coefficient C_p est fonction de k , et il est donné par le constructeur en fonction du type de capteur comme indiqué dans le Tableau 2.

TABLEAU 2

VALEURS DES COEFFICIENTS K ET C_p POUR EOLIENNE

k	0	1.3	2.1	2.7	3.4	5	5.8	6.3
C_p	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1

Nous définissons le couple développé sur le rotor de l'éolienne de la manière suivante:

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (4)$$

$$\text{Avec } T = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2 \cdot \omega} = C_p \cdot \frac{R \cdot \rho \cdot S \cdot V^2}{2 \cdot k} \quad (5)$$

Dans le cadre de l'insertion d'unités décentralisées de production dans les réseaux électriques, il faudra étudier les moyens à mettre en œuvre ces unités pour la compensation de la puissance réactive et le contrôle de la puissance active, ainsi que le contrôle de la valeur efficace de la tension. Les unités de production de moyenne puissance (généralement inférieures à 600 kVA) sont équipées, en général, de machines asynchrones à cage.

En effet, la génératrice asynchrone à cage est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie éolienne à vitesse fixe. Cette génératrice peut fonctionner à vitesse variable, grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance, et peut générer une production de puissance électrique sur une vaste gamme de vitesse de vent.

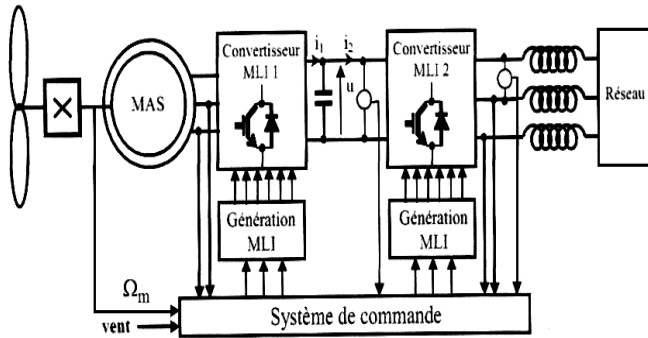


Fig. 2. Chaîne de conversion éolienne

La figure 2 montre la structure complète de la chaîne de conversion munie de ses organes de commande.

La rareté des énergies non renouvelables, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique et les risques nucléaires ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire [9].

IV. REGULATION MECANIQUE DE LA VITESSE DE L'EOLIENNE

D'après l'équation (2), on peut voir que la puissance produite est indéfiniment croissante en fonction de la vitesse du vent, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Les dispositifs de sécurité de la machine éolienne font en sorte à avoir l'expression de la puissance répartie sur différentes gammes de vitesses du vent (Figure 3).

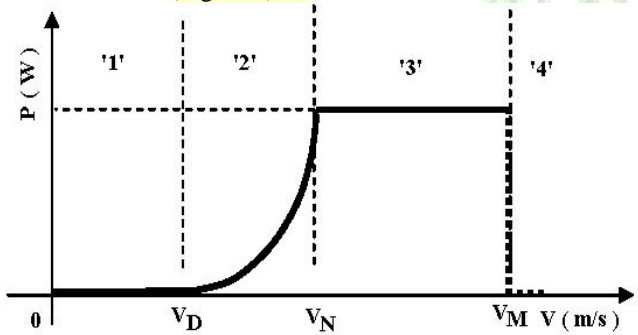


Fig. 3. Réponse en puissance d'un aérogénérateur à l'état stationnaire

Les vitesses V_N , V_D et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent [16]:

- La zone '1', où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas),
- La zone '2', dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v ,
- La zone '3', où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_N ,
- La zone '4', dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

V. L'IMPACT DES EOLIENNES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

La production traditionnelle est basée sur des centrales thermiques classiques ou nucléaires ainsi que sur des centrales hydrauliques. Ce type de production d'électricité est souple d'utilisation (grâce à la disponibilité de l'énergie primaire) et répondent aux critères techniques permettant la sauvegarde du réseau, tandis que les énergies renouvelables sont fortement dépendantes de la disponibilité de la source primaire et de ne répondent pas ou peu aux critères de sauvegarde du réseau ou de pollution électrique. Dans cette partie seront développés les problèmes induits par l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux, les différentes contraintes de raccordements des productions centralisées au réseau et enfin les perspectives d'amélioration de l'intégration de ces générateurs éoliens au réseau.

L'insertion des générateurs éoliens dans les réseaux pose plusieurs problèmes. Dans cette section, les divers effets de leur intégration dans les réseaux seront introduits.

La circulation d'un courant dans ce conducteur va créer une chute de tension ΔV . Cette chute de tension peut être exprimée en fonction des puissances active et réactive qui transitent dans le conducteur soit :

$$\Delta V \approx \frac{rP + xQ}{V_2} = V_1 - V_2 \quad (6)$$

On peut donc constater que la tension est dépendante des fluctuations de puissances et des valeurs d'impédance mises en jeu en fonction de l'endroit où l'on se trouve sur le réseau. La tension est donc une grandeur locale car elle diffère en tout point du réseau. Cette grandeur est donc réglée localement. Souvent par zone sur le réseau, en produisant (groupes de production, condensateurs, FACTS) ou en absorbant l'énergie réactive (inductances, FACTS):

Sur le réseau de transport $x \gg r$, alors:

$$\Delta V \approx \frac{xQ}{V_2} = V_1 - V_2 \quad (7)$$

Les fluctuations rapides de faible amplitude de la tension sont appelées Flicker. Dans le cas des éoliennes, ces variations sont dues aux fluctuations de la vitesse du vent, aux limites mécaniques de l'éolienne (par exemple du pitch control) et à l'effet d'ombre causé par le passage des pales devant le mat. Ce sont les éoliennes à vitesse fixe qui sont les plus défavorables du point de vue de ces phénomènes. La technologie d'éolienne la mieux adaptée pour limiter l'impact sur le réseau de ces variations est celle complètement interfacée avec le réseau via de l'électronique de puissance permettant ainsi un certain découplage entre la turbine et le réseau. Les éoliennes, interface au réseau via des convertisseurs totalement commandés équipés de transistors IGBT, actuellement les plus utilisés, génèrent des harmoniques hautes fréquences (plusieurs kHz), mais ces harmoniques peuvent être assez aisément limités contrairement aux convertisseurs partiellement commandés, équipés de thyristors,



généralisant des harmoniques de basse fréquence nécessitant des filtres conséquents pour les éliminer.

Les générateurs éoliens, tout comme la majorité des générateurs décentralisés, sont très sensibles aux perturbations du réseau et ont tendance à se déconnecter rapidement lors d'un creux de tension (dès que la valeur de la tension est inférieur à 80% de la tension nominale) ou lors d'une variation de la fréquence.

VI. COMPORTEMENT D'UN SHED AUTONOME A DIFFERENTES VITESSES D'EOLIENNE

Le SHED peut être une solution pour les régions éloignées d'un grand réseau interconnecté. Maintenant, les deux sources d'énergie testées auparavant sont synchronisées, afin de maintenir la tension et la fréquence de notre système autonome SHED constantes, avec une variation de la charge et une perturbation du vent (figure 4).

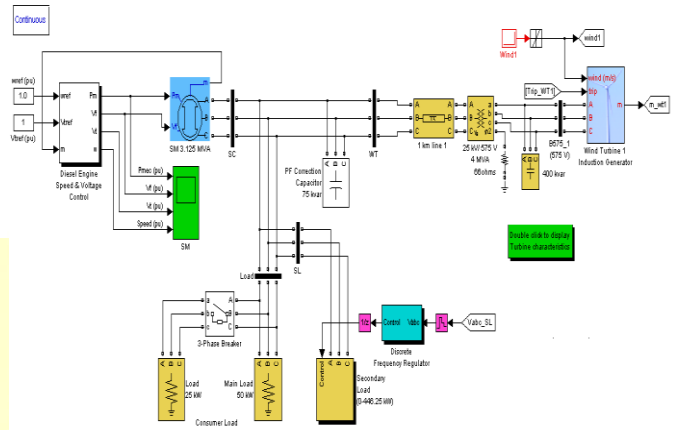


Fig. 4. Configuration typique d'un modèle hybride (éolien-diesel)

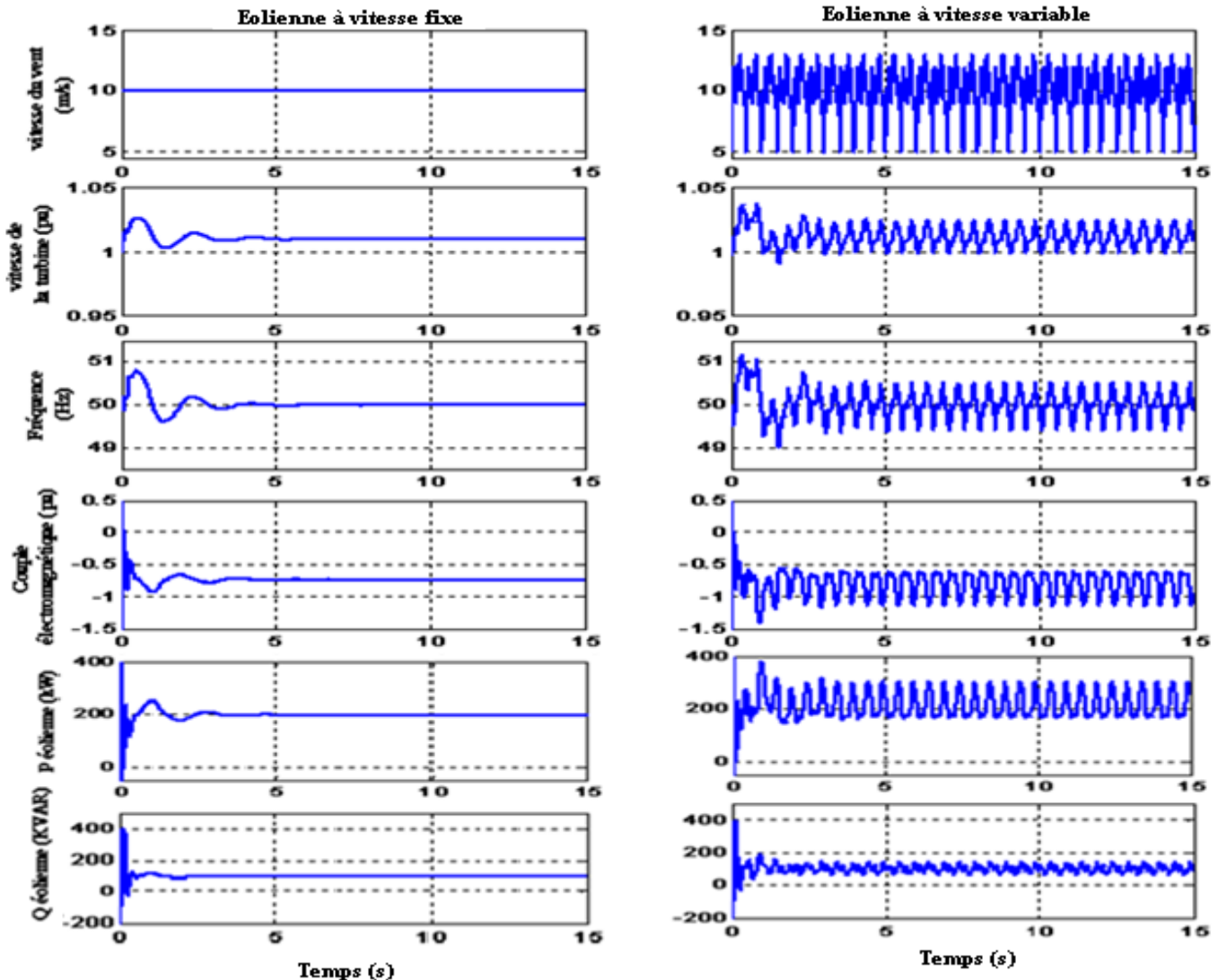


Fig.6. Formes d'ondes de la vitesse du vent, vitesse de la turbine, la fréquence et le couple électromagnétique et la puissance active et réactive pour deux cas de fonctionnement d'éolienne à vitesse fixe et à vitesse variable



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2016

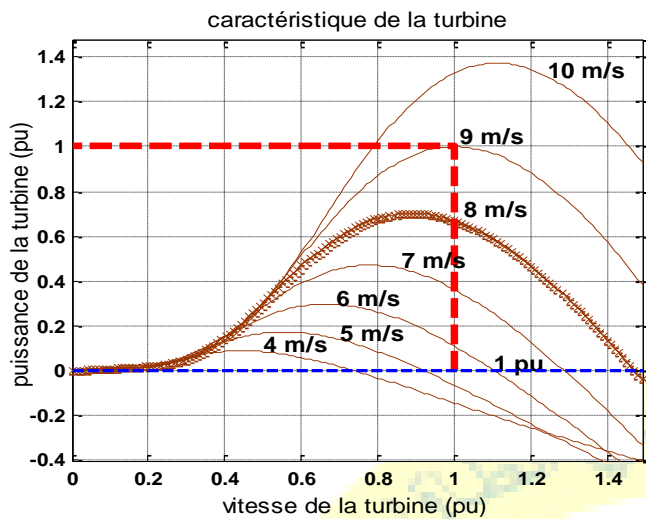


Fig. 5. Puissance d'une turbine en fonction de sa vitesse de rotation, paramétrée en vitesse du vent.

La caractéristique de la puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de la turbine est tracée dans la figure 5 pour des vitesses de vent allant de 4 m/s à 10 m/s, cela montre que la position du maximum de la puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Si la vitesse du vent est par exemple de 8 m/s, la puissance fournie par la turbine décrira la courbe tracée en caractères '+', et la vitesse du vent nominal donnant la puissance nominale de mécanique (1pu = 3 MW) est de 9 m/s est tracé en traits rouge pointer. L'objectif de la vitesse variable est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse du vent pour travailler en permanence à la puissance maximum.

L'attention a été focalisée sur le comportement du SHED face aux variations climatiques. Pour cette raison, on a structuré ce modèle en deux cas. Dans le premier cas, la vitesse du vent est considérée constante, tandis que dans le deuxième elle est variable.

La figure 6, représente les résultats obtenus de la vitesse du vent dans les deux cas de la fréquence, la vitesse de la turbine de l'éolienne ainsi que le couple électromagnétique, ainsi que les puissances actives et réactives respectivement du système.

Les résultats de simulation montrent le bon fonctionnement de notre SHED. La tension et la fréquence sont maintenues constantes et la charge est servie en permanence durant tous les modes de fonctionnement. Au début de la simulation et pour les deux modes de fonctionnement, l'éolienne commence à fournir de la puissance active mais reste insuffisante. Pour combler le manque de puissance.

VII. CONCLUSION

Le système étudié met en œuvre un ensemble d'équipements, très différents, destinés à cohabiter dans une structure de cogénération alimentant une charge isolée. Pour mieux cerner la nature des interactions entre les différents sous ensembles de ce système, une approche d'étude de la

dynamique de chaque sous système a été adoptée. Le raccordement de la GD aux réseaux de distribution effectue considérablement l'exécution et la fiabilité de réseaux. La dissertation se concentre sur l'impact de GD's sur les arrangements de commande et de protection de réseaux. Ainsi, l'étude de l'hybridation a été faite en suivant les éléments clés du système: le Gd, la turbine éolienne, et la connexion de l'ensemble.

De prime abord, nous avons situé ce sujet dans son contexte socioéconomique. Ce dernier est marqué par les constats des détériorations environnementales engendrées par l'exploitation sans cesse croissante des énergies fossiles. Par ailleurs, les difficultés d'acheminement du carburant servant à alimenter les Gds, moyen classique de production d'énergie en zones isolées, montre bien la nécessité de disposer d'une source d'énergie renouvelable.

Ainsi deux problématiques complémentaires ont été abordées telle que la continuité de la production électrique accompagné d'une bonne qualité à fournir aux clients sensibles. Cependant nos études sur ce vaste problème qui est la modélisation et la simulation d'hybridation éolien-diesel, reste dans une dynamique d'amélioration.

Une étude dynamique sur des périodes plus longues, prenant en compte le stockage d'énergie et la commutation des sources pourront aussi s'ajouter aux modèles présents. Enfin, l'intégration des différents modèles dans un logiciel spécialisé d'étude des SHED, sera l'une des préoccupations futures.

REFERENCES

- [1] Tandjaoui M. Nasser, "Etude de l'Apport des FACTS dans un Réseau Distribué", Thèse Doctorat Es-Science, 28 Sep 2014, Université de Béchar, Algérie.
- [2] Organization for Economic Co-Operation and Development (OECD), "Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets", OECD/IEA, 2002.
- [3] M. N. Tandjaoui, C. Benachaiba, O. Abdelkhalek et B. Denai, "Renewable energy and its impact in power quality of distribution systems", SSC5'2012, College of Applied Sciences. Umm Al-Qura University. Makkah, April 16-18, 2012.
- [4] M.N.Tandjaoui, M.Haidas, C.Benachaiba, "Intégration des éoliennes pour la Production d'Énergie Électrique en Algérie - Site Tindouf-" 10ème SIPE, Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1 (2010).pp 183-188.
- [5] V. P. Galigekere, M. K. Kazimierzczuk, Role of Power Electronics in Renewable Energy Systems, paper in Wright State University
- [6] M. N. Tandjaoui, C. Benachaiba, M. Saidi, Y. Mouloudi, B. Denai and O. Abdelkhalek, Apport des éoliennes dans les réseaux électriques - Utilisation d'un SVC - SIPE'11, Béchar, Algérie, 2011.
- [7] S. Nii, M. Kato, Power Electronics Technology that Supports Smart Grid, Vol. 57 No. 4 Fuji Electric Review
- [8] M. N. Tandjaoui, C. Benachaiba, O. Abdelkhalek, B. Denai and Y. Mouloudi, The Impact of Wind Power Implantation in Transmission Systems, TerraGreen 13, Libanon, Energy Procedia, Elsevier, 2013
- [9] F. Lov, F. Blaabjerg, power Electronics control of wind energy in distribution power systems, n°=18, pp-333:365, intechopen, In Tech Europe, University Campus
- [10] F. Belhamel, S. Moussa, K. Benfarhatt F. Kharchi, "Analyse des Contraintes Mécaniques Agissant sur un Pylône Haubané d'Aérogénérateur et Technologies Mises en Œuvre pour son Installation", Rev. Energ. Ren.: ICPWE (2003)125-130.



**Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 4th International Seminar on New and Renewable
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2016**



- [11] F. Boukli Hacène, N. Kasbadji Merzouk, L. Loukarfi, "Analyse statistique et élaboration d'un atlas éolien de la vallée du Cheliff", Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 583 – 588.
- [12] M. Belatel, H. Benalla, "Etude par CAO d'une machine synchrone à aimant permanent pour la production d'énergie éolienne", Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 (2008) 167 – 180.
- [13] M. Adjoudj, M. Abid, A. Aissaoui, Y. Ramdania, H. Bounoua, "Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne", Revue«Nature et Technologie», n° 02/Janvier 2010. Pages 27 à 34
- [14] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben ahmed, "Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance", Electrotechnique du Futur 2001 – Nancy 14-15 novembre 2001. pp. 17-22.
- [15] K. Belmokhtar, M.L. Doumbia, K. Agbossou, "Modélisation et commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissances au réseau électrique", 4^{ème} CIGE'10, 03-04 Novembre 2010, Journal of Scientific Research N° 0 vol. 2 (2010).
- [16] B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, "Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie", J3eA- Vol. 5 – Hors Série 1 (2006).
- [17] R. Maouedj, S. Bousalem, B. Benyoucef, "Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens", Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 (2008) 239 – 250
- [18] B. Multon, G. Robin, O. Gergaud, H. Ben ahmed, "Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne", JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.

