

Etude du comportement d'une Aéroturbine : éolienne urbaine à axe horizontal

A. NAAMANE , M. BENSOAM, N.K MSIRDI

Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes

Avenue escadrille Normandie Niemen

13397 Marseille cedex 20

Aziz.naamane@lisis.org

Résumé – l'objet de ce papier est de présenter les premiers résultats obtenus en matière de rendement énergétique en utilisant un nouveau concept d'aérogénérateur : l'AEROTURBINE qui est destinée à être installée et exploitée en milieu urbain. Cette analyse est conduite dans le but de la modélisation, en vue de la gestion du système du stockage de l'énergie, sa conversion l'optimisation de la consommation. Nous nous intéressons dans cette activité, à la gestion et au contrôle de systèmes multi énergies, pour leur optimisation.

Mots-clés — Eolienne Urbaine, Energie, Rendement, Aérogénérateur, Aéroturbine, Stockage d'énergie, Gestion de systèmes multi énergies.

I. Introduction :

Parmi les énergies renouvelables, l'éolien a le plus fort potentiel de développement et représentera une part majoritaire dans la production d'énergies renouvelables hors hydraulique. L'éolien apportera ainsi sa contribution à l'indépendance énergétique de la France. Deuxième gisement éolien d'Europe (ressources en vent) après le Royaume-Uni, la France tente actuellement de combler le retard accumulé dans son exploitation. L'obligation d'EDF dans l'achat d'électricité d'origine éolienne rend les investissements éoliens rentables. Les objectifs affichés pour l'éolien sont de 10 000 MW en 2010 (6 000 à 9 000 éoliennes).

La montée du prix des [énergies fossiles](#) a rendu les recherches dans le domaine de l'éolien plus attirantes. La technologie actuellement la plus utilisée pour capter l'énergie éolienne consiste à placer au bout d'un axe horizontal des [pales](#) formant une [hélice](#). Certains prototypes utilisent un axe de rotation vertical: une nouvelle technologie à axe vertical est celle du [kite wind generator](#) (inspirée du [kitesurf](#)) qui, pour capter un vent le plus fort possible, utilise des câbles et des ailes qui peuvent arriver à 800/1 000 m de hauteur.

La technologie à axe horizontal présente certains inconvénients :

- L'encombrement spatial est important, il correspond à une sphère d'un diamètre égal à celui de l'hélice, reposant sur un cylindre de même diamètre. Un mât de hauteur importante est nécessaire pour capter un vent le plus fort possible.
- Le vent doit être le plus régulier possible, et donc interdit des implantations en milieu urbain ou dans un relief très accidenté.
- Une pale de 40 mètres qui décrirait une rotation par seconde verrait son extrémité avancer à une vitesse de 250 m/s, soit environ 900 km/h. C'est la raison qui explique le bruit aérodynamique des pâles et une des raisons de la mise en arrêt des éoliennes par vent fort. Dans la pratique, les pâles des grandes éoliennes ne dépassent jamais une vitesse de l'ordre de 100 m/s à leur extrémité. En fait, plus l'éolienne est grande, et moins le rotor tourne vite (moins de 10 tours/minute pour les grandes éoliennes offshore).
- La production énergétique dépend directement de la force du vent, indépendamment des besoins, il faut donc prendre en compte l'évolution journalière ou saisonnière de la courbe de charge, voire le stockage de l'énergie produite.

Les nouvelles éoliennes en cours de développement permettent d'aboutir à une technologie qui s'affranchit du bruit, de l'encombrement et de la fragilité des éoliennes à pales, tout en étant capables d'utiliser le vent quelle que soit sa direction et sa force. Nous proposons dans ce cadre un prototype d'une éolienne à axe horizontal

II. Description de l'éolienne

L'AEROTURBINE se présente ainsi sous la forme d'une éolienne à axe horizontal dont les pâles sont en position horizontales et symétriques, contrairement aux éoliennes classiques dont les pâles sont placées à la verticale par rapport à l'axe de rotation qui lui, est horizontal. Ces pales demi coniques sont montées en position horizontale et symétrique. L'axe de rotation repose sur un support orientable maintenant l'hélice face au vent.

Les principaux avantages sont les suivants:

- Réduction des nuisances sonores ;
- Réduction de l'impact visuel ;
- Réduction des coûts de production ;
- Facilité d'installation, de maintenance ;
- Démarrage par vent faible....

Cette éolienne, contrairement aux classiques, travaille en volume et non pas en surface comme les autres. Ce détail est extrêmement important, car il permettrait de multiplier la puissance par huit en doublant l'échelle du modèle de base, tandis que sur une éolienne classique, la puissance serait seulement multipliée par quatre pour la même opération.



Figure 1 : vue de l'aéroturbine

Donc à égale d'échelle, cette éolienne devrait être deux fois plus puissante qu'une éolienne classique.

Les caractéristiques de ce nouveau concept d'aérogénérateur (vitesse de rotation, couple et puissance) sont présentées. Les mesures réalisées sur la maquette seront exploitées par la suite sur un site pilote pour d'une part confirmer le rapport de puissance et d'autre part pour continuer les études et l'optimisation du prototype.

Le premier travail effectué consiste à obtenir une idée de la puissance et du couple délivrés par la maquette suivant le vent, ainsi qu'une idée de la vitesse de rotation à vide toujours suivant le vent. Pour effectuer ces mesures, nous avons conçu un banc d'essai constitué :

- un anémomètre tripode manuel
- une soufflerie composée d'un moteur triphasé équipé de pâles
- un couple mètre permet de faire la mesure du couple
- le frein à poudre règle le couple résistant.

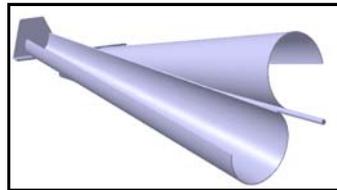


Figure 2 : Le banc de mesure

Réalisation des mesures mécaniques

Un premier essai à permis d'établir le lien entre la tension de l'alternostat appliquée sur le moteur de la soufflerie et le vent moyen correspondant.

Réalisation des mesures en charge



L'essai en charge a été réalisé avec le banc d'essai.

Une fois le montage réalisé, nous avons pris les mesures de couple, de vitesse de rotation en charge et à vide. Ces mesures ne concerne que la partie mécanique de l'éolienne. Les mesures électriques sur l'alternateur seront réalisées à part.

Nous avons obtenu les courbes suivantes :

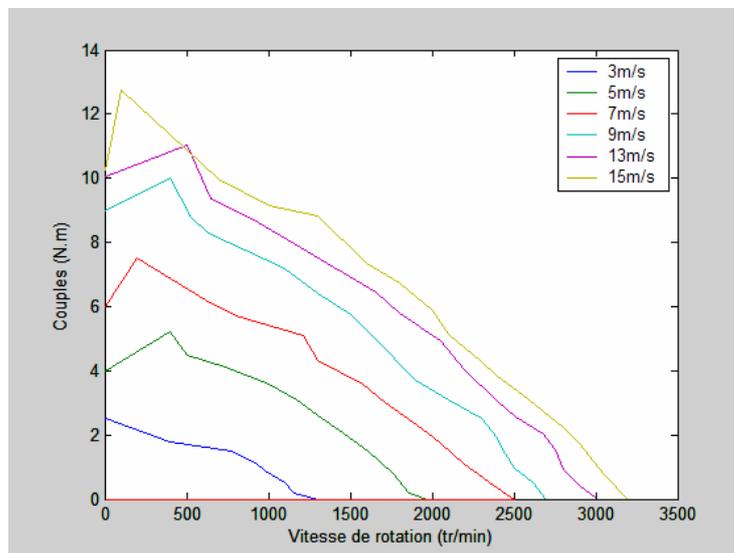


Figure 5 : courbes des couples

Nous pouvons dire que le couple varie approximativement d'une façon linéaire et décroissante.

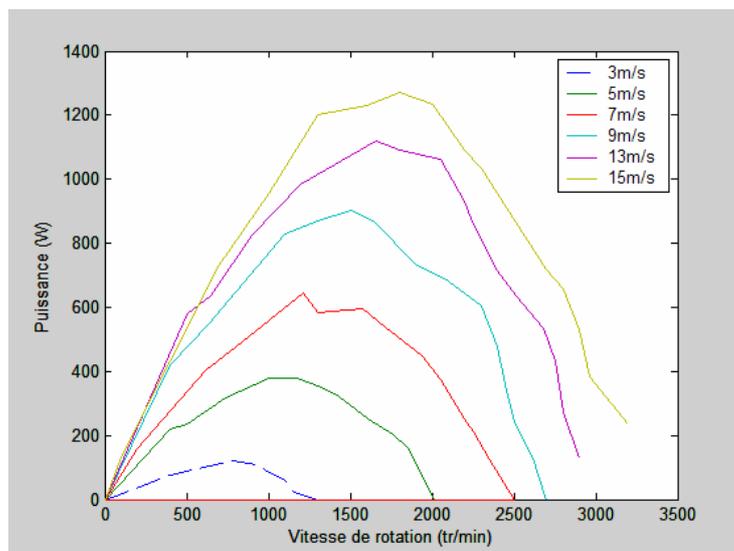


Figure 6 : courbes des puissances

Les courbes de couple, de puissance et de vitesse de rotation en fonction du vent ont été réalisées de la façon suivante :

Pour chaque vitesse de vent, correspondant donc à une tension précise de la soufflerie, nous avons relevé la puissance, le couple maximal et la vitesse de rotation de l'éolienne.

Nous nous sommes aperçus que plus la vitesse du vent était importante plus la puissance ou le couple augmentait de façon non linéaire.

Sur la courbe de puissance, pour un vent de 2m/s, la puissance relevée est de 150 W, si on double la vitesse du vent, donc pour 4 m/s, la puissance relevée est de 900 W. Donc en doublant la vitesse du vent, la puissance fournie par l'éolienne n'est donc pas linéaire.

Production de l'énergie électrique.

L'objectif est de trouver un ensemble de conversion mécanique-électrique qui s'adapte aux fortes variations de production. Nous allons raisonner sur l'ensemble constitué de la machine électrique et de son convertisseur de puissance associé. Les contraintes sont les suivantes.

- vitesse variable de 0 à 1000 tr/min
- éviter les réducteurs de vitesse qui font perdre en rendement
- tension de sortie fixe
- optimisation de la puissance fournie

Pour cela plusieurs solutions électrotechniques sont possibles. Nous avons choisi de nous orienter vers une machine synchrone à aimants permanent pour sa facilité de maintenance associée à un redresseur commandé pour le contrôle de l'énergie. Il est possible de réaliser une machine avec un grand nombre de paires de pôles (24) pour que son rendement soit maximum aux alentours de la vitesse moyenne de l'éolienne (~700tr/min) afin d'avoir une prise directe du rotor avec l'éolienne. De plus, la structure à aimants évite d'avoir des conducteurs dans la partie tournante et donc des pertes dans les contacts glissants.

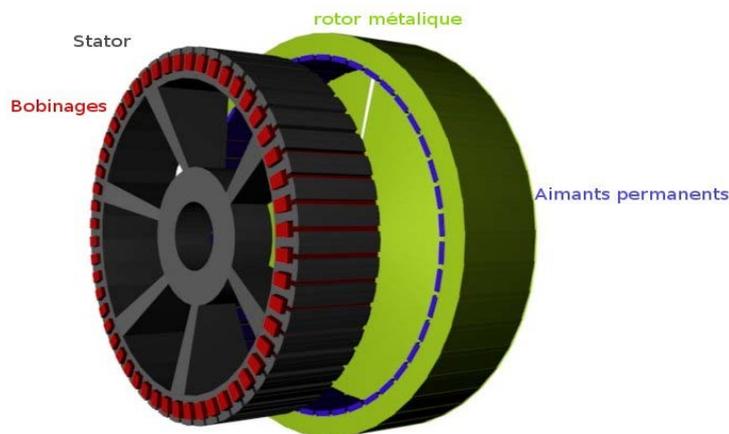


Figure 10: Structure interne éclatée de la machine synchrone à aimants

Le stator et les bobinages forment la partie fixe de la génératrice synchrone. Les aimants sont fixés en périphérie sur le rotor qui est entraîné par l'éolienne. Les trois phases de la machine alimentent le convertisseur de puissance triphasé qui contrôle le transfert d'énergie.

La figure ci-dessous nous donne le rendement de l'ensemble génératrice convertisseur en fonction du courant pour plusieurs vitesses allant de 300 à 1200 tr/min.

Nous voyons qu'à faible vitesse le rendement est mauvais ce qui se rajoute au fait que la puissance disponible est faible.

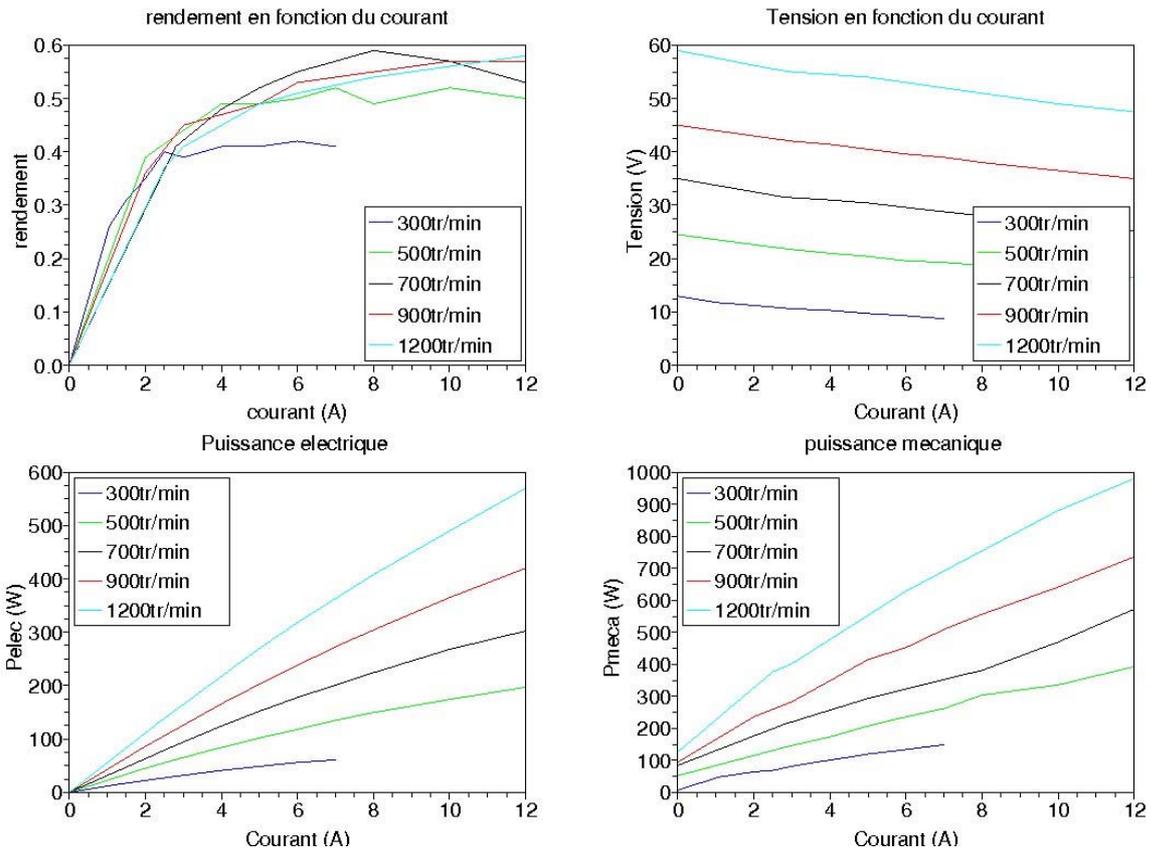


Figure 11: Caractéristiques de l'ensemble génératrice convertisseur en fonction du courant pour plusieurs vitesse.

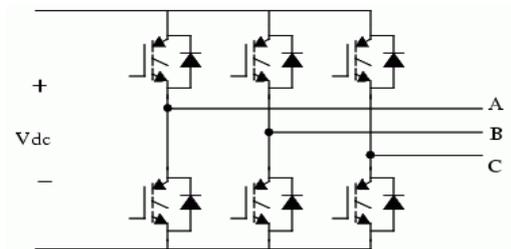


Figure 12: Redresseur Onduleur triphasé à IGBT

Des essais ont été réalisés sur le prototype de 800W pour établir les performances du système.

Optimisation

Le contrôle du convertisseur de puissance doit s'effectuer en optimisant la puissance disponible en sortie du système. Si nous utilisons un redresseur à diode comme convertisseur de puissance, c'est la tension de la batterie qui va imposer le point de fonctionnement et la puissance disponible ne sera pas forcément optimum. En utilisant un redresseur MLI commandé (figure ci-dessus) nous pouvons imposer un point de fonctionnement qui tienne compte de la puissance mécanique maximum disponible en fonction de la vitesse du vent ainsi que du rendement de la partie électrique. Ce procédé permet un gain considérable surtout en période de faible vent.

Gestion du système du stockage de l'énergie électrique.

Différents modes de stockage pour l'habitat

Dans les applications de bâtiment autonome visées par ce type d'éolienne, le stockage de l'énergie reste un problème majeur pour adapter la production au besoin de l'utilisateur. Les solutions suivantes qui sont au stade de recherche-développement peuvent fournir des solutions surtout si elles sont combinées.

volant d'inertie

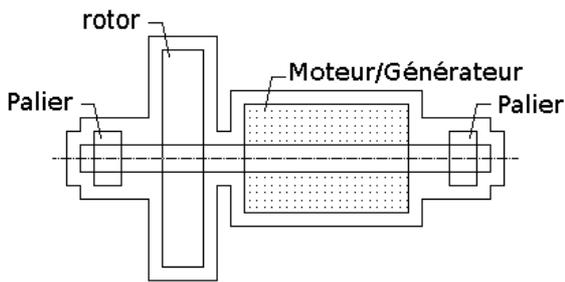


Figure 7 : Volant d'inertie pour stockage

Les systèmes de stockage par volant d'inertie, ont des capacités de 0.5 à 500kWh. L'énergie stockée est $\frac{1}{2}Jw^2$ où J (kgm^2) est le moment d'inertie du volant et w (rad/s) est la vitesse angulaire du système.

Ce système perd moins de 0.1% de l'énergie stockée par heure si des paliers magnétiques sont utilisés. L'énergie peut ainsi être stockée sur de grandes périodes et être restituée sur des intervalles de temps court en fonction de la demande. Il fonctionne comme des batteries mécaniques.

stockage par la filière hydrogène

La fabrication d'hydrogène peut être un moyen de stockage de l'énergie. La production a lieu pendant les périodes de vent et s'adapte à la quantité d'électricité disponible. Des électrolyseurs de forte puissance ont été réalisés dans des projets européens comme RES2H2 (figure ci-dessous) et la taille peut être adaptée aux applications domestiques (quelques kW) et le stockage peut atteindre plusieurs jours.



Figure 8 a : Réservoirs d'hydrogène (volume 32l à 700bars, poids 28 kg b: électrolyseur de forte puissance (250kW).

Cette filière reste encore onéreuse à ce jour mais les développements actuels peuvent laisser penser à son utilisation pour l'habitat.

stockage par batteries

Actuellement les batteries au plomb sont les plus utilisées pour le stockage mais elles présentent des problèmes de poids, de vieillissement et de fiabilité. De plus, leur capacité de stockage reste limitée.

De nouvelles technologies de batterie apparaissent actuellement sur le marché. On peut citer les batteries **Ions-Polymères** et **lithium-ions** qui sont principalement utilisées pour les GSM, les ordinateurs portables, les caméscopes, etc. Ces batteries ont comme principal avantage une grande capacité pour un faible poids. Elles offrent jusqu'à 50% d'énergie en plus que les batteries **NiMH** et le double de l'énergie des batteries **NiCd**. Coûteuses à l'achat, elles nécessitent un système de surveillance et d'équilibrage de la tension de chaque élément de base (1.2V).

Les batteries sont des éléments incontournables de ce type de système ne serait-ce que pour assurer l'alimentation de toute l'électronique de contrôle.

Stockage thermique

Les jours de grand vent, les déperditions thermiques sont importantes. De plus la surcharge de l'éolienne doit être exploitée pour limiter sa vitesse. Une solution consiste à stocker de l'énergie sous forme de chaleur dans un plancher chauffant soit directement par des résistances électriques soit par l'intermédiaire d'un chauffe eau basse température.



Ce principe possède un bon rendement puisque l'énergie électrique issue de l'alternateur est directement utilisée.

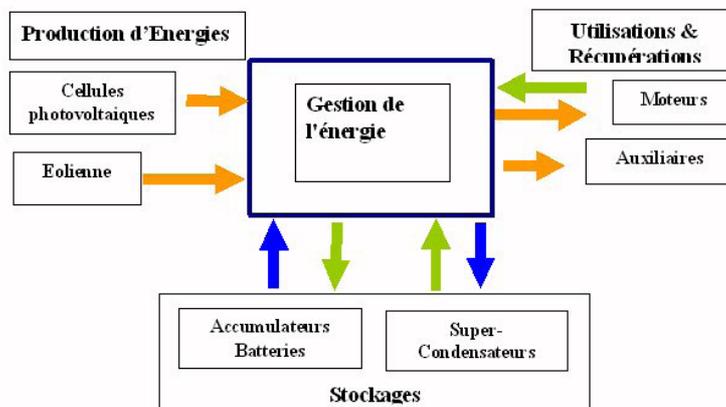
Figure 9 : Stockage thermique.

Conclusion et Perspectives

Dans ce papier nous avons présenté les premiers résultats obtenus en matière de puissance par un nouveau concept d'éolienne. Ces résultats doivent être confirmés par des expériences sur un site pilote. Cela permettrait d'une part de confirmer les tests de puissance réalisés en soufflerie sur l'éolienne et d'autre part, de mettre en œuvre les dispositifs électroniques de gestion sur un équipement électrique complet, monté sur une éolienne plus conséquente (en échelle 4 par rapport au modèle de base étudié précédemment).

Ce site nous permettrait de mettre en évidence le rapport de puissance qui existe entre différentes éoliennes de dimensions différentes. Théoriquement, en multipliant par quatre l'échelle du modèle de base, la puissance sur l'autre éolienne devrait être 64 (4^3) fois plus importante par rapport à une même vitesse de vent, (nous sommes en présence d'un concept exploitant le volume du vent brassé au lieu de considérer une surface)

L'objectif final de ce projet est de proposer une méthodologie pour la gestion de l'énergie électrique suivant le principe représenté ci-dessous :



Les capteurs sont utiles pour la surveiller le fonctionnement du système, mais ils ne sont pas toujours disponibles. On aura alors recours à la synthèse d'observateurs, d'estimateurs et de prédictors. La synthèse de ces éléments viendra compléter l'instrumentation du système pour permettre d'en améliorer la gestion et optimiser le fonctionnement. Nous développerons donc des observateurs robustes et un système de prédiction en ligne pour nous informer en temps réel à la fois des besoins d'énergie et du mode opératoire.

Plusieurs données sont à observer : les variables d'interfaces et échanges d'énergie entre le système et son environnement et les variables d'état des différentes parties du système. L'étape de mesure et d'évaluation est suivie par la commande du système et l'optimisation. Cette première étude, devrait définir des critères d'optimalité et de performance qui seraient utilisés pour le contrôle et la commande du processus en vue d'obtenir un bon fonctionnement.

Références :

- [1] B. MULTON : Les machines synchrones autopilotées. Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2004 ISBN : 2-909968-63-4
- [2] éolienne à axe verticale : http://www.windstuffnow.com/main/lenz2_turbine.htm.
- [3] Jérôme Delamare, Fabien Faure : Les paliers magnétiques. Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble. B.P. 46, 38402 Saint Martin d'Hères CEDEX - <http://www-leg.ensieg.inpg.fr>