



## L'ÉNERGIE ÉOLIENNE AU LIBAN : BILAN ANNUEL, RENDEMENT ET RENTABILITE

Georges GERGES\*, Ali EL-ALI\*, Nazih MOUBAYED\*, Rachid OUTBIB\*\*

\* *Laboratoire d'Electricité – Université Libanaise – Faculté de Génie 1  
Rue El Arez, El Kobbah, Tripoli, Liban  
Tél. : (961) 3 87 99 56 ; Télécopie : (961) 6 38 50 89  
Email : nmoubayed@ieee.org*

\*\* *LSIS – Université d'Aix Marseille III, Marseille, France*

**Résumé** – Le thème abordé dans cet article permet d'exploiter la conversion de l'énergie éolienne, non polluante, en énergie électrique. L'étude consiste à mettre en oeuvre une centrale de production à base d'énergies renouvelables; En ne considérant que l'énergie fournie par l'éolienne WS-400, on créera une base de données comportant la puissance délivrée par cette éolienne en fonction de la vitesse du vent. La création d'un réseau de neurones MLP approprié utilisant cette base de données dans la phase de l'apprentissage, nous aidera à déterminer le bilan mensuel et annuel de cette puissance pendant l'année 2006. Ensuite, les calculs détaillés du rendement et de la rentabilité de cette centrale sont présentés et discutés.

**Mots-clés** : *Energies renouvelables, énergie éolienne, réseaux de neurones, météo.*

### 1. INTRODUCTION

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais, avant de la consommer, il aura fallu la produire, en général, dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Dans les pays industrialisés, ce système est aujourd'hui très centralisé même si les évolutions de réglementation conduisent à une amorce de décentralisation de la production.

Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus, permet d'avoir des coûts de production faibles, mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Ainsi, la production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. En outre, la part du prix du combustible dans le coût de production est prépondérante, ce qui engendre, compte tenu du caractère sensible de ces matières premières, des oscillations continues et une instabilité à long terme. L'énergie de fission nucléaire, qui ne rejette directement pas de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique. Certes les risques d'accident liés à leur exploitation sont très faibles mais les conséquences d'un accident,

même très peu probable, seraient désastreuses. Le traitement des déchets, issus de ce mode de production, est très coûteux et, pour une part, leur radioactivité reste élevée durant de nombreuses années. De plus, l'accès à cette ressource aux pays en voie de développement nécessite des investissements lourds et un niveau de technicité élevé. Enfin, contrairement à une idée couramment répandue, les réserves d'uranium sont, comme celles de pétrole, limitées (moins de 100 ans au rythme actuel de la consommation).

Beaucoup plus accessibles et très adaptées à la production décentralisée, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Ces énergies sont en train de permettre de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre.

Au Liban, et d'après une enquête officielle, il ressort que les énergies renouvelables représentent moins de 1 % dans le bilan énergétique global [1]. Pour développer les recherches dans ce domaine, un banc d'essai est mis en place, depuis l'été 2006, au sein du Laboratoire d'Electricité de la Faculté de Génie à Tripoli – Liban. Il contient un petit site expérimental installé dans des conditions de proximité de l'habitat. Ce site est constitué d'un petit système de production multi sources (solaire et éolienne), d'une station météo et d'un dispositif de stockage de l'énergie [2].

Cet article porte seulement sur l'éolienne installée. Tout d'abord, la constitution du système utilisé est présentée dans le deuxième paragraphe. Le bilan énergétique est traité dans le troisième paragraphe. Ensuite, le calcul du rendement est détaillé dans le quatrième paragraphe. Dans le cinquième paragraphe, nous présentons le calcul et le choix des batteries à utiliser. Dans le sixième paragraphe, une étude développée de la rentabilité est discutée. Le septième paragraphe traite le calcul de la vitesse critique permettant de rendre l'utilisation de l'éolienne rentable. Puis nous terminons l'article par une conclusion.

## 2. LE SYSTEME EOLIEN INSTALLE

Le système installé est constitué de :

- Une éolienne WS-400 capable de fournir 400 Watts nominale à partir de l'énergie du vent [3],
- Régulateur transformant une puissance allant jusqu'à 400 Watts en une tension continue sous 12 V,
- Deux batteries 12 Volts - 40 Ah capables de stocker et de dépenser de l'énergie continue,
- Une charge continue, ou un onduleur de tension 12 V / 220 V suivi d'une charge alternative.

L'éolienne WS-400 considérée à la Faculté de Génie de l'Université Libanaise est caractérisée par les données présentées dans le tableau 1. Selon le constructeur, la caractéristique de la puissance en fonction de la vitesse de cette éolienne est illustrée sur la figure 1.

Modèle	WS400
Puissance de sortie nominale	400 WATTS
Vitesse du vent - ref. nominale	12,5 m/s (45 Km/H)
Vitesse de rotation nominale	900 tr/mn
Vitesse du vent au seuil de rotation	2 m/s (7,2 Km/H)
Vitesse du vent au seuil d'amorçage	3 m/s (10 Km/H)
Diamètre du Rotor	1,40 mètres
Matière des pales	Nylon renforcé fibres de carbone
Profil des pales	Type aviation
Résistance maximum	60 m/s (210 Km/H)
Système de coupure	Contrôle électrique
Installation électrique	12 Volts (Batterie)
Système d'entraînement	Direct par axe unique
Régulateur de charge	inclus
Protection de survitesse	Contrôle électronique du frein
Protection de sous tension	OUI
Protection de survoltage	OUI
Poids de la turbine	15 Kg
Poids brut emballage	20 Kg
Dimension du colis	1140 mm x 560 mm x 240 mm
Garantie	1 an
Entretien	Contrôle visuel semestriel

Tableau 1 : Eolienne WS-400

## 3. BILAN ENERGETIQUE

Afin de déterminer la puissance fournie par l'éolienne durant l'année 2006, et comme les mesures de la vitesse du vent en 2006 ont été déjà déterminées (figure 2) [4], il était plus opportun de s'en servir de cette base de données dans la caractéristique 'puissance / vent' de l'éolienne (figure 1) pour obtenir la puissance générée.

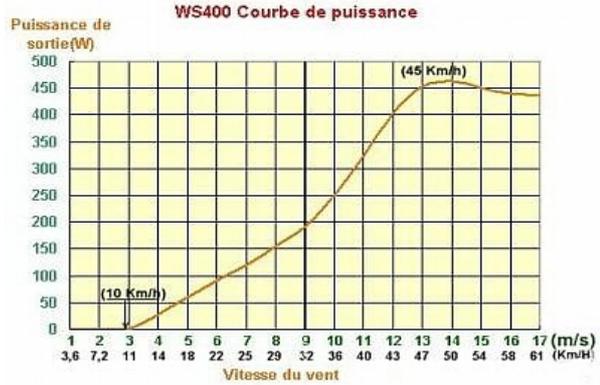


Figure 1 : Courbe de puissance relative à l'éolienne WS-400.

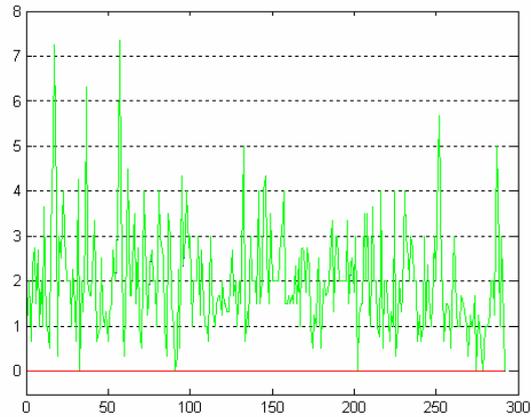


Figure 2 : Vitesse du vent à l'ULFG1 en 2006.

Pour cela, plusieurs mesures (vitesse du vent et puissance fournie) ont été réalisées à l'aide d'un capteur de vitesse approprié et d'un wattmètre numérique, pour permettre l'apprentissage du réseau de neurones qui aura pour but de calculer le bilan énergétique. Ces mesures sont faites lorsque les batteries sont presque vides et en présence d'une charge continue en parallèle pour absorber la totalité de la puissance fournie. La courbe obtenue par ces mesures vérifie totalement celle fournie par l'industriel qui fabrique ce genre d'éolienne (figure 3).

La courbe obtenue par ces mesures servira pour entraîner un réseau de neurones sur Matlab. Ainsi, une généralisation de la production de l'éolienne en WATTS sera possible à partir d'une valeur quelconque de la vitesse du vent. La programmation d'un réseau de neurones MLP pour les vitesses supérieures à 9 m/s et un autre linéaire pour les vitesses inférieures à 9 m/s (vitesse pour laquelle la courbe est non dérivable) permettra alors la généralisation de la production de l'éolienne pour des vitesses du vent inférieures à 17 m/s (vitesse critique pour laquelle il y aurait débranchement de l'éolienne pour des raisons de sécurité impliquées par le fabricant).

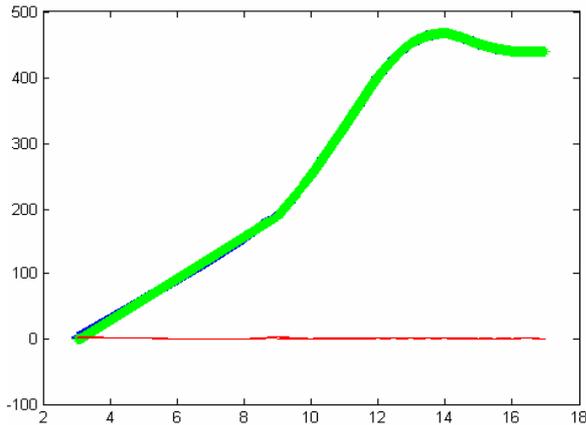


Figure 3 : Courbe de puissance après programmation sur Matlab.

Nous remarquons que les courbes apprises par le réseau de neurones (la courbe bleue est la courbe réelle, la courbe verte est celle apprise et la courbe rouge est celle de l'erreur qui est inférieure à 1 %) nous permettent d'obtenir une bonne précision dans la correspondance 'Puissance – Vitesse du vent'.

Les puissances fournies mensuellement par l'éolienne pendant l'année 2006 sont données sur le tableau 2. Le bilan énergétique est illustré alors sur la figure 4.

Mois en 2006	Puissance en kWh
Janvier	6,17728
Février	5,89902
Mars	7,00264
Avril	3,47154
Mai	0
Juin	12,45260
Juillet	2,50979
Août	0,15127
Septembre	11,73015
Octobre	1,97758
Novembre	3,09608
Décembre	2,08025

Tableau 2 : Puissance mensuelle obtenue.

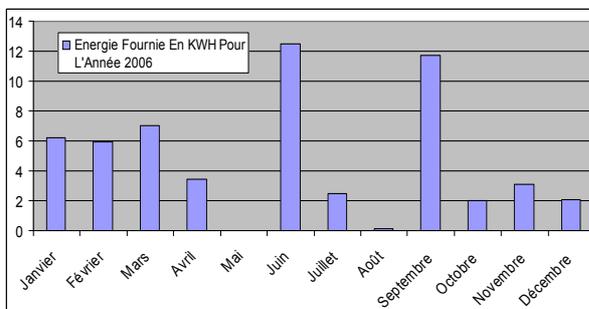


Figure 4 : Energie fournie en kWh pour l'année 2006.

Le bilan énergétique de l'éolienne WS-400 positionnée à l'ULFG1, pendant toute l'année 2006, nous délivre une énergie annuelle fournie égale à 56,55 kWh.

#### 4. CALCUL DU RENDEMENT

##### 4.1. Principe

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique [5]. La puissance récupérable par une éolienne est fonction du carré de son diamètre et du cube de la vitesse du vent, comme le montre la formule suivante [6] :

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times C_p$$

avec :

$\rho$  : la densité volumique de l'air (1,225 kg/m<sup>3</sup> à 15°C et 1013 mbar) soit à peu près 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

$A$  : la surface balayée par le rotor (m<sup>2</sup>).

$V$  : la vitesse du vent (m/s).

$C_p$  : le coefficient de performance (sans unité), ce coefficient varie au maximum entre 20 % et 40 % (calculable selon les grandeurs nominales).

##### 4.2. Rendement de l'Eolienne WS-400

Selon le constructeur, le fonctionnement de l'éolienne utilisée est prévu pour une durée de vie supérieure à 15 ans, en effet :

- Les pales profitent des dernières avancées technologiques et sont moulées avec une extrême précision en résines renforcées en fibres de carbone.
- Elles ont une résistance exceptionnelle et tournent pratiquement sans bruit ni vibration (< 50 dB).
- Générateur en aluminium moulé très résistant à la corrosion (sable, sel, pluie ...).
- Sans balai avec aimants permanents de haute technologie, pas de bruit et pas d'usure.
- Roulements sans entretien, tout est prévu pour une bonne longévité.

D'après les données du constructeur, la turbine éolienne de 400 Watts à 3 pales est conçue pour fournir sa puissance nominale pour un vent de 12,5 m/s. Les pales ont une longueur de 0,7 m et la vitesse nominale de la turbine est de 900 tr/min. Pour ces valeurs, la surface balayée par les pales :

$$A = \pi.r^2 = \pi.0,7^2 = 1,539 \text{ m}^2.$$

La puissance disponible du vent par mètre carré :

$$P_v = 0,6.V^3 = 0,6 \times 12,5^3 = 1171,875 \text{ W / m}^2.$$

La puissance disponible pour faire tourner l'éolienne :

$$P_d = P_v \times A = 1171,88 \times 1,539 = 1803,5 \text{ W}.$$

Le rapport en pourcentage entre la puissance électrique et la puissance du vent :

$$\eta = \frac{\text{Puiss. fournie}}{\text{Puissance du vent}} = \frac{400 \text{ W}}{1803,5 \text{ W}} = 0,2218 = 22,18 \%$$

D'où, cette éolienne peut fonctionner avec un rendement de 23 % environ.

La vitesse de l'extrémité des pâles est :

$$V = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Omega = 2 \times \pi \times 0,7 \times 900 = 3958,4 \text{ m / min} \\ = 65,97 \text{ m / s} = 237 \text{ km / h.}$$

Le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse des vents qui doit être compris entre 4 et 8 [6] est :

$$R_v = \frac{\text{Vitesse des pales}}{\text{Vitesse du vent}} = \frac{65,97}{12,5} = 5,28.$$

## 5. CHOIX DES BATTERIES

### 5.1. Batteries et accumulateurs rechargeables

On distingue plusieurs types de batteries (ou accumulateurs). Parmi les plus courantes, on citera :

- Les batteries au plomb.
- Les batteries Ni-Cd (Nickel cadmium).
- Les batteries Ni-MH (Nickel Hydrure Métallique – ou encore Nickel Hybride).
- Les batteries Lithium-ion.

La capacité d'une batterie s'exprime en Ampère×Heure ou éventuellement en Watt×Heure. Le Watt×Heure étant le produit de l'Ampère×Heure par la tension de la batterie.

Vue que le Ni-Cd étant plus robustes et plus adaptées pour des charges et décharges brusques et à hauts courant [7] et dont le prix est le plus approprié pour une durée de vie donnée, ce type de batteries est utilisé dans notre banc d'essai. Pour une durée de 20 ans avec un accumulateur 12V Ni-Cd 40 A.h (à changer en permanence), un budget de 250 \$ ou 375'000 Livres Libanaises (LL) est suffisant.

### 5.2. Puissance et nombre de batteries à utiliser

Considérons le cas de l'éolienne WS-400 montée avec son propre régulateur 12 Volts. En effet, les courbes obtenues durant l'année 2006 nous donnent une énergie maximale de 8.8 kWh pendant une seule journée de juin (la durée de charge est donc: 24 heures). Au début de ce jour, on suppose que les batteries installées sont vidées jusqu'à 5 % par le consommateur durant des journées précédentes [8]. Ce même consommateur va utiliser à peu près 80 % de cette énergie fournie dans un tel jour d'été. Le reste de cette énergie sera consacré à la charge des batteries.

Si nous voulons profiter au plus possible de l'énergie restante (plus que 80 % pour ne pas épuiser trop le système (éolienne, redresseur et batteries)), nous devons installer des batteries dont la capacité totale de charge pourrait supporter une telle puissance pendant une telle durée avec une réserve au moins de 5 % et cela puisqu'une batterie ne se charge pas, ni ne se décharge pas complètement. Soit alors le calcul suivant :

L'équivalent Ampère×Heure pour une telle durée est :

$$\frac{8,8 \times 1000 \times 0,2 \times 0,8}{14 \text{ V}} = 100,5 \text{ A.h} \quad \text{et}$$

$$\frac{100 \text{ Ah}}{100 \% - 5 \% - 5 \%} = 111 \text{ Ah} \approx 100 \text{ A.h. .}$$

Pour plus de sécurité dans le système global, il est préférable d'augmenter le nombre de batteries pour avoir une réserve d'énergie si l'une des batteries tombe soudainement en panne.

Soit finalement le choix de deux batteries NI-Cd 50 Ah, sinon, les deux batteries Ni-Cd 40 Ah (très connues au marché) restent suffisants.

## 6. RENTABILITE

Un investissement est une immobilisation de capitaux permettant l'acquisition d'un bien qui est le grand moteur d'énergie éolienne qui assure l'électricité utile dans notre société. On doit choisir la solution la plus rentable à l'aide de l'utilisation de certaines notions en mathématiques financières. Pour l'étude de la rentabilité dans notre cas, nous signalons certaines hypothèses :

- Le 1 kWh pris comme unité de mesure ou unité d'œuvre.
- La durée de vie du bien est d'une période prévisionnelle égale à 20 ans.
- Le taux d'actualisation est d'une valeur approximative égale à 9 % (bons de trésor).

Deux choix sont à distinguer :

- *1er choix* : C'est le cas d'investissement ou l'achat de l'éolienne.

Le coût d'achat pour 56.6 kWh éolien assurant l'utilisation de l'électricité annuelle pour 20 ans est égal à 3'000'000 LL + 2 × 375'000 LL = 3'750'000 LL (prix de l'éolienne et frais de l'installation + prix des batteries). Donc Le coût d'achat pour 155.07 W.h éolien assurant l'utilisation de l'électricité quotidienne pour 20 ans est égale à : 3'750'000 LL. Prenons pour cela la date "0" comme date d'investissement. Alors la valeur actuelle reste à la date "0" égale à  $V_0 = 3'750'000 \text{ L.L.}$

• 2ème choix : c'est le choix d'utilisation de l'Electricité Du Liban (EDL).

Pour étudier l'actualisation des versements payés, prenons, à titre d'exemple, certaines hypothèses :

- Le coût de 1 kWh = 140 L.L (tarif maximal d'après EDL).

- Période = 1 an, alors le nombre de période est égal à la durée de vie du projet, c'est à dire, 20 ans.

Soit **a**, montant de terme, le coût de l'utilisation moyenne pour le 1 kWh pour une période (une année).

$a = \text{Puissance Journalière kW} \times \text{Coût de kWh} \times \text{Nombre d'heures par jour} \times \text{Nombre de jours/an};$

$a = 1 \text{ kW} \times 140 \text{ LL/kWh} \times 24 \text{ h/jour} \times 365 \text{ jour/année} = 1'226'400 \text{ L.L} / \text{année}.$

La somme que nous cherchons sera :

$$S = a \times \frac{155,07 \times 10^{-3} \text{ kWh}}{24 \text{ heures}} = 7'924 \text{ LL} / \text{an}.$$

Cette somme pourra être obtenue de la façon suivante :

$$S = 56,6 \text{ kWh} / \text{an} \times 140 \text{ LL} / \text{kWh} = 7'924 \text{ LL} / \text{an}.$$

Pour étudier la valeur actuelle pour le paiement de 1 kWh pour 20 ans à EDL, il faut définir les notations suivantes :

$n =$  le nombre de période égal à 20 ans,

$i =$  le taux d'actualisation, qui est pris à une valeur 9 % (bons de trésor au Liban),

La valeur actuelle de la somme versée des termes,  $V_0$ , est donnée par :

$$V_0 = S \times \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} = 7924 \times \frac{1 - (1,09)^{-20}}{0,09} = 72'335 \text{ L.L.}$$

Par conséquent, on remarque que la valeur actuelle  $V_0$  déterminée dans le 1<sup>er</sup> choix est très grande devant celle calculée selon le 2<sup>ème</sup> choix :

$$3'750'000 \text{ L.L.} \gg 72'335 \text{ L.L.}$$

Dans ce cas, et à titre d'exemple, le prix du kWh éolien est environ 50 fois plus grand que celui de l'EDL. Inversement, le prix du kWh de l'EDL ne représente que 2 % de celui obtenue par l'éolienne.

Pour une même période égale à 20 ans, le 2<sup>ème</sup> choix indiquant l'obtention de l'électricité d'après l'EDL est plus rentable. Cette conclusion reste valable si et seulement si le prix du kWh payé à l'EDL reste fixe pendant les 20 ans, durée du projet. Sinon, il faut reprendre le calcul.

En plus, Pour la même période, 20 ans, le montant actuel (sans intérêt) nécessaire pour payer l'EDL est :

$$7'924 \times 20 = 158'480 \text{ LL} .$$

Par conséquent, le prix du kWh éolien devient 23 à 24 fois plus important que celui de l'EDL.

## 7. VITESSE CRITIQUE DU VENT

Cherchons la vitesse du vent journalière (en moyenne) qui permet de rendre le système rentable, c'est-à-dire, la vitesse pour laquelle l'investissement par éolienne coûtera la même somme qu'un investissement avec l'EDL (pour un prix actuel de 140 LL/kWh et une somme totale de 3'750'000 LL).

Cherchons tout d'abord si cette vitesse est permise et ensuite raisonnons. Pour cela, résolvons le système suivant :

$$3'750'000 \text{ L.L.} = Q(\text{kWh}) \times 140 \text{ L.L.} / \text{kWh}$$

d'où :

$$Q = 26'785,7 \text{ kW.h.}$$

C'est l'énergie qui égalise la quantité d'énergie produite par l'éolienne durant 20 ans et qui peut être achetée au prix actuel de 140 LL/kWh pour une somme de 3'750'000 L.L.

L'énergie annuelle **E** serait :

$$E = \frac{Q(\text{kWh})}{20 \text{ ans}} = 1'339,3 \text{ kWh} / \text{an}.$$

L'énergie journalière moyenne **J** serait :

$$J = \frac{E(\text{kWh} / \text{an})}{365 \text{ jours} / \text{an}} = 3'666,8 \text{ W.h} / \text{Jour}.$$

La puissance journalière moyenne **P** serait :

$$P = \frac{J(\text{kWh} / \text{Jour})}{24 \text{ h} / \text{Jour}} = 153 \text{ W}.$$

Ce résultat est très important puisque cette puissance est inférieure à la puissance nominale de l'éolienne (400 W) de 2 à 3 fois et ne nécessite pas ainsi un épuisement de l'éolienne.

La vitesse moyenne journalière serait :

$$V_{\text{moy}} = 8,1 \text{ m/s}.$$

Cette vitesse du vent est très acceptable puisqu'elle n'est pas assez élevée. Pour n'importe quelle vitesse du vent appartenant à la plage (8.1 m/s – 17 m/s), l'investissement avec l'éolienne WS-400 sera plus profitable que l'investissement avec EDL.

Cependant une recherche doit être faite pour trouver des endroits pour lesquelles la vitesse du vent moyenne par jour ait de telles valeurs (Des endroits proches de la mer et même dans la mer peuvent être de bons solutions).

De plus, cette vitesse critique va aussi diminuer au dessous de 8.1 m/s dans les prochaines années puisque le prix de telles éoliennes va diminuer et puisque le prix du kWh par l'EDL va augmenter par raison de diminution rapide des ressources pétrolières [9].

## 8. CONCLUSION

L'impact de l'activité humaine sur l'environnement global menace la survie de la biosphère et des générations futures. Le réchauffement de la planète le prouve d'année en année avec la montée des eaux due à la fonte des glaces. Pourtant, c'est seulement depuis quelques années que l'homme commence à prendre conscience de ces dangers. L'utilisation d'énergies renouvelables est l'une des principales réponses à ce problème.

Les éoliennes présentent une source d'énergie parmi les plus propres et les désagréments qu'elles peuvent présenter sont facilement évitables si elles font l'objet d'une gestion précise et intelligente. Les éoliennes ne sont peut-être pas la solution idéale, mais leur réversibilité fait d'elles des championnes du développement durable.

Au Liban, les éoliennes ne se trouvent réellement que depuis peu de temps. L'étude sur le système de production à énergie renouvelable présenté dans cet article est énormément importante pour le dimensionnement et l'étude économique d'un tel système. Certes, d'un point de vue énergétique, l'énergie éolienne ne pourrait en aucun cas subvenir aux besoins de tout le Liban pour le moment. En effet, certaines zones comme par exemple les côtes de mer et les zones éloignées pourraient posséder des conditions favorables à leur implantation tandis que d'autres comme les villes et les villages ne sont pas adaptées à ce type d'énergie. Mais les éoliennes respectent la nature, elles ne rejettent rien, c'est un avantage incontestable.

Le travail abordé dans cet article a consacré dans sa plus grande partie l'analyse du comportement d'une éolienne de type WS-400 de faible puissance pendant l'année 2006. Ce genre d'éolienne est très répandu aux marchés mondiaux et présente une caractéristique vitesse-puissance très connue. Ce but ne pourrait être atteint sans faire un lien entre les mesures de la vitesse du vent pour l'an 2006 et la puissance correspondante fournie, nous avons eu alors recours aux réseaux de neurones. La programmation de tels réseaux de neurones de type MLP a été accomplie à l'aide du logiciel MatLab. Nous avons procédé aussi à des simulations pour déterminer le bilan énergétique en 2006. De même, nous confirmons l'intérêt des réseaux de neurones dans les recherches puisqu'un simple programme informatique nous a permis d'évaluer le rendement et la rentabilité d'une Eolienne spécifique.

Les résultats obtenus nous montrent que le rendement de l'éolienne est limité à 23 %, et que le prix du kWh obtenu par l'Electricité du Liban est plus rentable que celui obtenue par l'éolienne. Le pourcentage est de 2% dans le cas de notre banc d'essai installé au sein de l'Université Libanaise. Ce pourcentage augmentera si l'éolienne est placée dans une zone où la vitesse moyenne du vent par jour est supérieure à 8 m/s. Dans ce cas, nous pouvons dire que la production de l'énergie électrique à partir de l'éolienne devient rentable.

## Références

- [1] *Possibilité et vision de la production de l'énergie des sources d'énergie renouvelables dans les pays d'ESCWA*. Rapport interne des Nations Unies, vol. 3, 2001, Beyrouth, Liban.
- [2] M. Zakaria, A. El Ali, N. Moubayed et R. Outbib, *Energie solaire : Bilan annuel, Rendement et Rentabilité*, EPE 2006, 4th International Conference on Electrical and Power Engineering, 12-13 Octobre 2006, IASI – Roumanie, Vol. C, pp. 1571-1578.
- [3] Site Web : <http://www.energie douce.com/>.
- [4] G. Gerges, A. El Ali, N. Moubayed et R. Outbib, *Using weather parameters to manage the produced renewable energy*, EEC 2007, The first Electrical Engineering Conference, 26-28 Juin 2007, Alep – Syrie.
- [5] O. Gergaud, *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*, Thèse de l'ENS de Cachan, 9 décembre 2002.
- [6] T. Wildi et G. Sybille, *Electrotechnique*, ISBN : 2-8041-4892-0, 4<sup>ème</sup> édition, de boeck.
- [7] J. Alzieu, *Stockage 'multi-batterie' pour alimentations photovoltaïque autonomes, L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables*, Ed. Novelect - Ecrin, mai 2002, pp. 89-96.
- [8] Site Web : <http://www.cler.org>, Comité de Liaison des Energies Renouvelables (CLER).
- [9] *Environmental Costs of Electricity*, Pace University Center for Environmental Studies, New York, Oceana Publications, 1991.