



Coût de production de l'électricité d'origine éolienne en Algérie

GUERRI Ouahiba
Directrice de Recherche,
de Division Energie Eolienne - CDER
E-mail : o.guerri@cder.dz

Avec l'évolution de la technologie éolienne et une meilleure prise en charge de tous les facteurs influents, le coût de l'énergie électrique produite par l'exploitation de l'énergie éolienne a beaucoup baissé ces dernières années. Comparée aux autres sources (classiques et renouvelables) de production d'électricité, l'énergie électrique d'origine éolienne est la plus compétitive notamment lorsque cette énergie est produite à partir d'installations *Onshore* et lorsque les conditions d'exploitation sont favorables. Mais combien coûte le kilowattheure produit par un parc éolien ?

Levelized Cost of Electricity

Le coût du kilowattheure (kWh) d'origine éolienne est souvent exprimé par le paramètre LCOE (ou *Levelized Cost of Electricity*). Le LCOE est le coût actualisé du kWh pour toute la durée de vie des installations. Il est égal au quotient de la valeur actualisée du parc éolien (PVC ou *Present Value of Costs*) par l'énergie produite (E) durant toute la durée de vie du parc éolien :

$$LCOE = \frac{PVC}{E}$$

Les principaux paramètres qui influent sur le PVC sont les coûts d'investissements, les coûts de fonctionnement et de maintenance, la durée de vie des éoliennes, le taux d'amortissement des investissements et le taux d'inflation. Les coûts d'investissements comprennent principalement les coûts d'acquisition des éoliennes et de leur transport sur site, les frais d'étude du projet, les frais de Génie Civil, les frais d'installation des éoliennes et des transformateurs, les frais de réalisation du réseau électrique interne à la ferme ainsi que les frais de raccordement au réseau de distribution d'électricité.

L'énergie électrique produite (E) par un parc éolien durant sa durée de vie est proportionnelle à la puissance nominale des éoliennes installées et à leur coefficient d'utilisation CF (ou *Capacity Factor*). Ce coefficient CF varie principalement avec la vitesse du vent moyenne disponible à la hauteur du mât de l'éolienne (voir le tableau 1 proposé par *Hélimax Energie* [1]). Il est à noter que ce tableau est applicable lorsque les vents sont fréquents, réguliers et varient peu autour de ces vitesses moyennes. Le potentiel éolien disponible influe donc également sur le coût de l'électricité produite par un parc éolien.

Tableau 1. Variation du CF avec le potentiel éolien disponible (1)

V (m/s)	CF (%)	Classement des sites
6 – 7	28.4	Acceptable
7 – 8	33.5	Très bonne
8 – 9	38.6	Excellente
> 9	43.6	Exceptionnelle

Estimation du LCOE éolien

Les coûts d'acquisition des éoliennes varient avec leur puissance nominale (voir des valeurs spécifiques dans le Tableau 2) et représentent plus de 70% de l'investissement initial. Les frais de Génie Ci-

vil et autres frais sont évalués à 20% du coût des éoliennes. Les coûts de fonctionnement et maintenance sont estimés à 25% du coût initial d'investissement (i.e. coût des équipements/durée de vie).

Tableau 2. Coûts spécifiques d'acquisition des éoliennes (2)

P_n (kW)	Coût spécifique (USD/kW)	Coût spécifique moyen (USD/kW)
< 20	2200 – 3000	2600
20 – 200	1250 – 2300	1775
> 200	700 – 1600	1150

Pour estimer le LCOE éolien, nous admettons que les taux d'inflation et d'intérêt sont de 8% et 6% respectivement, que la durée de vie des éoliennes est de 20 ans et que les coûts spécifiques des éoliennes varient de 1150 USD/kW à 1600 USD/kW. Il est à noter que selon un rapport de l'*US Department Of Energy*, les coûts d'acquisition des éoliennes aux USA variaient de 850 à 1250 USD/kW en 2015 (rapport publié en Août 2016). Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 1 qui montre que le coût du kilowattheure éolien varie de 2.59 cUSD/kWh à 3.60 cUSD/kWh lorsque les éoliennes sont installées dans des sites où la vitesse du vent à la hauteur de l'éolienne est de l'ordre de 6 à 7 m/s. Le LCOE éolien varie de 1.69 cUSD/kWh à 2.35 cUSD/kWh lorsque la vitesse du vent moyenne, à la hauteur du mât, est supérieure à 9 m/s.

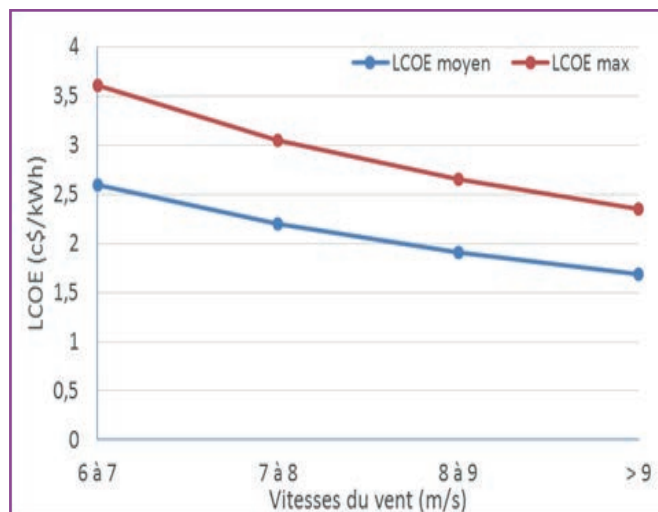


Figure 1: Variation du LCOE avec le potentiel éolien disponible

Les coûts de l'électricité produite à Kaberten

D'une puissance installée de 10.2 MW, le parc éolien de Kaberten est composé de 12 éoliennes de puissance unitaire 850 kW. Il est situé à 72 km au nord de la wilaya d'Adrar. Les études d'évaluation du potentiel éolien disponible en Algérie montrent que les vitesses de vent moyennes dans cette région sont de l'ordre de 6 m/s, à 10 m de hauteur. Les éoliennes étant installées sur des mâts de 55 m de



hauteur, la vitesse du vent disponible à la hauteur du mât devrait être de l'ordre de 8 m/s.

Investissement initial. Comme précédemment, nous supposons que les coûts d'acquisition des éoliennes varient de 1150 USD/kW à 1600 USD/kW. L'investissement initial varie alors de 14.0 à 19.6 millions USD. De même, nous admettons que les taux d'inflation et d'intérêt sont de 8% et 6% respectivement et que la durée de vie des éoliennes est de 20 ans.

Energie électrique produite. Une analyse des données enregistrées par le système de contrôle-commande de la ferme éolienne a montré que l'énergie électrique fournie par le parc après une année de fonctionnement était de 19.5 GWh. Le coefficient d'utilisation correspondant est CF = 21.84%. La production énergétique de l'éolienne qui a fonctionné assez régulièrement était de 2.11 GWh avec un CF = 28.36%. Si toutes les éoliennes ont la même fiabilité que cette dernière, la production énergétique du parc éolien atteint 25.32 GWh. Ces résultats sont moyens compte tenu du potentiel éolien disponible. En effet, à la hauteur du mât (55 m), la vitesse du vent moyenne devrait être de 8 m/s et selon le rapport Helimax [1], le CF serait alors de l'ordre de 33.5%.

Le coût du kWh éolien de Kaberten. Pour l'évaluation du LCOE du parc de Kaberten trois scénarios sont considérés :

- Scénario 1 : l'énergie électrique fournie par le parc est l'énergie calculée à l'aide des données enregistrées pour toutes les éoliennes durant la première année de fonctionnement
- Soit : E1 = 19.5 GWh
- Scénario 2 : l'énergie électrique fournie par le parc est égale à l'énergie fournie par les éoliennes si elles étaient toutes similaires à l'éolienne la plus fiable
- Soit : E2 = 25.3 GWh
- Scénario 3 : l'énergie électrique fournie par le parc est évaluée compte tenu du potentiel disponible.
- Soit : E3 = 29.9 GWh

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 3 qui montre que le coût de l'électricité produite dans le cas le plus défavorable (scénario 1) varie de 3.37 à 4.69 cUSD/kWh. Dans le cas le plus favorable (scénario 3), le coût du kWh éolien varie de 2.2 à 3.06 cUSD, selon le coût d'acquisition des éoliennes.

Tableau 3. Coût de l'énergie électrique produite par le parc de Kaberten

Scénario	LCOE (cUSD/kWh)
1	3,37 – 4,69
2	2,63 – 3,66
3	2,20 – 3,06

Les Coûts de l'éolien dans le monde et mesures incitatives

Les coûts du kWh éolien dans le monde varient selon les régions et selon le type d'installation *Onshore* ou *Offshore*. Ainsi, dans un rapport de l'IRENA [3], il est noté que le LCOE moyen de l'éolien *Onshore* varie de 0.06 USD/kWh à 0.09 USD/kWh, selon les régions. Les coûts de production et d'installation des éoliennes *Offshore* sont plus élevés. Le LCOE de l'éolien *Offshore* varie de 0.10 USD/kWh pour les parcs éoliens installés près des côtes asiatiques à 0.17 USD/kWh en Europe (3). Mais selon les prévisions, ces derniers chiffres sont

appelés à baisser de 24% à 30% à l'horizon 2030 et de 35% à 41% en 2050 (4).

En 1984, le LCOE moyen de l'éolien (*Onshore*) était de 0.30 USD/kWh. La réduction du coût de l'éolien est dû à l'essor des installations éoliennes et au développement de l'industrie éolienne qui n'aurait pu se faire sans les diverses mesures incitatives qui ont été mises en place dans différents pays. Parmi ces mesures incitatives sont citées :

- L'exonération de la TVA
- Les crédits d'impôt, basés sur la production d'électricité ou sur l'investissement
- Les tarifs de rachat de l'électricité produite (*Feed-in tariff*), basés sur la production ou sur l'investissement

Les crédits d'impôt sont des incitations fiscales mises en place aux USA. Les crédits d'impôt basés sur l'investissement octroient aux nouveaux propriétaires d'installations éoliennes (de toute taille) des crédits d'une valeur de 30% de la valeur de l'installation. Le crédit d'impôt basé sur la production est d'une valeur de 2.3 cUSD/kWh d'électricité produite (5).

Les feed-in tariffs appliqués dans quelques pays

Le calcul du *feed-in tariff* adopté en France est basé sur les données réelles des fermes installées. Le tarif applicable pour les 10 premières années est de 9.22 cUSD/kWh (8.2 c€/kWh). À l'issue des dix premières années de fonctionnement de l'installation, une durée annuelle de fonctionnement de référence est calculée (La durée annuelle de fonctionnement est définie comme le quotient de l'énergie produite pendant une année par la puissance maximale installée).

Pour les 5 années suivantes, un réajustement est appliqué selon cette durée de référence. Le tarif de rachat varie alors 1.12 à 9.22 cUSD (2.8 – 8.2 c€) par kWh produit [6]. Au Portugal le tarif moyen appliqué pour les installations existantes est 8.43 cUSD/kWh (75 €/MWh). Les *feed-in tariffs* appliqués en Grande Bretagne varient selon la taille de l'installation. Pour les installations dont la puissance installée est comprise entre 1.5 MW et 5 MW, le tarif appliqué est 1.12 cUSD/kWh (0.85 p/kWh). En Turquie, le *feed-in tariff* est fixé à 7.3 cUSD/kWh pendant une période de 10 ans et est applicable aux installations mises en service avant le 31 décembre 2020. Un bonus de 3.7 cUSD/kWh est accordé pendant 5 ans en cas d'utilisation de composants fabriqués localement. Les producteurs peuvent vendre l'électricité produite au concessionnaire national ou à des particuliers dans le cadre de convention bilatérale [6].

Références

1. Hélimax Energie Inc., (2004) Étude sur l'évaluation du potentiel éolien, de son prix de revient et des retombées économiques pouvant en découler au Québec, Technical report, Helimax.
2. Adamarola, M. S., Paul, S. S., & Oyedepo, S. O., (2011) Assessment of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems in north-central Nigeria, Energy Conversion and Management, 52, 3363–3368.
3. IRENA (2015), Renewable Power Generation Costs In 2014.
4. Joshua Hill, Wind energy costs set to continue to decline, according to Berkeley Lab (<http://reneweconomy.com.au>).
5. US Department of Energy, Federal Incentives for Wind Power, DOE/GO-102013-3899, 2013
6. GWEC (2015) Global Wind Report Annual Market Update.