



A XI-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională,  
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești",  
SEBEȘ, 2011

## **MODELISATION DE L'IMPACT DE LA MAINTENANCE SUR LE "LIFE CYCLE COST" D'UN PARC D'EOLIENNES**

Alexis LUGAND, Bélahcène MAZARI, Khalil KASSMI, Farid BAGUI

### **MODELAREA IMPACTULUI MENTENANȚEI ASUPRA "COSTULUI CICLULUI DE VIAȚĂ" A UNUI PARC DE EOLIENE**

În cazul integrării surselor de energie regenerabilă, calculul LCC (Life Cycle Cost – costul ciclului de viață) este considerat ca fiind cel mai bun mod de a evalua impactul asupra mediului. Costul ciclului de viață al unei turbine eoliene poate fi împărțit în șase părți: dezvoltarea, proiectarea, fabricarea, instalarea, exploatarea și dezafectarea. Această lucrare este o contribuție la evaluarea costurilor de operare ale unei ferme eoliene de 2 MW, reprezentând partea stohastică în calculul LCC. O bază de date pe 5 ani de funcționare a 208 turbine eoliene răspândite în peste 35 de parcuri a fost folosită pentru a da o primă estimare a LCC pentru fiecare turbină și ca să se definească tendințele temporale ale MTBF și MTTR.

Cuvinte cheie: eoliană, ciclu de viață, costuri de exploatare

### **MODELISATION OF THE MAINTENANCE IMPACT ON THE "LIFE CYCLE COST" OF WIND TURBINE PARKS**

In the case of the integration of renewable energy sources, the calculation of LCC is considered as the best way to assess the impact on the environment. The Life Cycle Cost of a wind turbine can be divided into six parts: design, development, manufacturing, installation, operation and decommissioning. This paper is a contribution to assess the costs of operating a wind farm of 2MW representing the stochastic part in the calculation of the

. A database of 5 years functioning of 208 wind turbines spread over 35 parks has been used to give a first estimate of the LCC of each turbine and define temporal trends of MTBF and MTTR.

Keywords: wind, life cycle operating costs

Mots clés: éolien, cycle de vie, coûts d'exploitation

## 1. Introduction

Aujourd'hui les produits sont tenus d'être fiables et doivent répondre aux normes d'éco conception. Il faut qu'ils remplissent leurs fonctions de façon sûre sans trop d'impact sur l'environnement et soient d'un entretien facile durant toute leur durée de fonctionnement jusqu'au démantèlement et recyclage. De ce fait, la rentabilité d'un parc d'éoliennes englobe le coût d'acquisition du produit, le coût de l'exploitation et de la maintenance du produit pendant sa durée de fonctionnement (coût de propriété) ainsi que le coût du démantèlement. Ce qui induit notamment une problématique liée à l'estimation des coûts d'exploitation et de maintenance, qui est le cœur de nos investigations. Il est à rappeler que les coûts liés à la production sont accessibles.

Les décisions prises concernant la conception et la fabrication d'un produit peuvent affecter sa rentabilité, sa sécurité, sa fiabilité et sa maintenabilité. Pour satisfaire le client, le défi pour les fournisseurs est de concevoir des produits qui répondent à ces exigences. Idéalement, il convient que ce processus d'optimisation commence dès la conception du produit et se développe pour prendre en compte tous les coûts relatifs à sa durée de vie.

Notre travail consiste à exploiter les résultats issus de l'analyse des différentes phases du cycle de vie d'une éolienne, afin d'estimer le coût de revient en fonction de la puissance de la machine. L'objectif étant d'avoir une méthode permettant de prédire le coût global d'une éolienne ou d'un parc d'éoliennes tout au long de sa période de fonctionnement. Nous nous intéresserons principalement aux estimations des coûts liés à la maintenance préventive et curative. Dans cet article nous présenteront, les résultats de l'évaluation du coût du cycle de vie (Life Cycle Cost) des éoliennes de type 2MW. Ces résultats sont menés sur une base de données réelle issue de différents parcs représentant environ 210 éoliennes et ceci sur un horizon moyen de 5 ans. Ces résultats seront confrontés aux modèles théoriques concernant les prédictions des taux de défaillance. Nous

présenterons également une validation des outils de calcul des MTBF (Mean Time Between Failure), MTTR (Mean Time To Repair), pour ce type d'éoliennes. L'objectif de notre travail est de fournir un outil décisionnel aux clients et également aux fournisseurs de produits pour qu'ils puissent optimiser leurs conceptions par l'évaluation d'alternatives et en réalisant des études de compromis. Ils peuvent évaluer diverses stratégies de fonctionnement, de maintenance et de démantèlement pour optimiser le coût du cycle de vie. L'évaluation du coût du cycle de vie peut effectivement être appliquée pour déterminer les coûts associés à une activité spécifique, par exemple, les effets de différentes approches/concepts de maintenance, pour couvrir une partie spécifique d'un produit, ou pour couvrir seulement une phase sélectionnée ou des phases du cycle de vie d'un produit.

## 2. Résultats et discussions

Aujourd'hui, plusieurs entreprises et pays en général investissent dans des procédés propres visant à renforcer leurs performances énergétiques. C'est dans ce cadre que l'éolien s'est imposé sous différentes formes, on shore, offshore ou encore des petites installations à destination du grand public. Cependant, différents travaux ont été menés pour évaluer le coût global de la production de cette énergie. Ce coût intéresse les investisseurs, les fabricants ainsi que les exploitants. Ce coût reste également le seul moyen pour évaluer l'impact écologique de cette technologie [1]. Un des moyens pour évaluer ce coût est d'utiliser la méthode coût de cycle de vie (LCC: Life Cycle Cost).

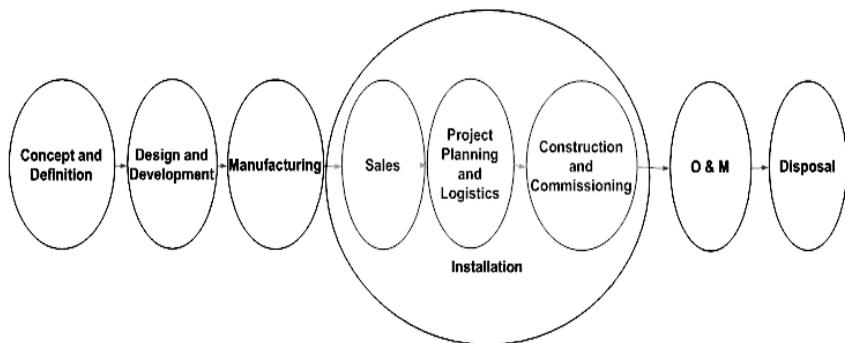


Figure 1 Cycle de vie d'une éolienne

Le LCC d'un produit est le cumul des coûts de ce produit de la phase de conception au démantèlement. Il comprend donc la conception de l'éolienne, son développement, sa production, son installation, son exploitation et enfin son démantèlement comme le montre la Figure 1.

Aujourd'hui, à la notion de produit se substitue la notion de services attendus. Le prix d'acquisition fait ainsi place à la notion de coût de possession qui prend en compte les coûts d'exploitation et de maintenance. Par exemple, dans le cas d'une éolienne, le prix d'achat, du point de vue du client représente la partie visible de « l'iceberg », mais il faudra lui ajouter le coût de la maintenance, des dépannages, des pièces de rechanges, etc. Dans l'évaluation des coûts de maintenance pour le calcul du LCC, celle concernant la partie électronique reste la plus dominante en termes de remplacement des pièces. Cependant, une maintenance curative d'organes tels que les pales peut mobiliser des ressources importantes.

La notion d'évaluation du coût de cycle de vie implique une compréhension élémentaire du cycle de vie d'un produit et des activités réalisées au cours de ces phases. Il est également essentiel de comprendre le rapport entre ces activités et les performances, la sécurité, la fiabilité, la maintenabilité et les autres caractéristiques du produit, contribuant aux coûts du cycle de vie. Ce modèle général peut se décomposer comme suivant:

$$\text{LCC} = C_{\text{conception}} + C_{\text{développement}} + C_{\text{fabrication}} + C_{\text{installation}} + C_{\text{exploitation}} + C_{\text{démantèlement}}$$

Dans cette relation (1) on retrouve les coûts d'acquisition :

$$\text{LCC}_{\text{acquisition}} = C_{\text{conception}} + C_{\text{développement}} + C_{\text{fabrication}} + C_{\text{installation}}$$

Le  $\text{LCC}_{\text{acquisition}}$  est évalué à partir des données des constructeurs.

Dans ce cadre, plusieurs travaux ont été publiés [1-3] permettant d'évaluer le LCC d'éoliennes installées en offshore and on shore.

Dans un rapport publié en 2006, les auteurs ont présenté un travail qui permet d'évaluer le LCC pour chaque partie d'une éolienne [2]. Notamment dans l'article [1] une évaluation de l'impact d'un parc d'éoliennes de puissance 1 kWh sur l'environnement a été présentée. Dans la référence [2] les auteurs ont réalisé une analyse concernant les matériaux utilisés pour la construction des éoliennes.

## **2.1. Conception, Design et Développement**

Dans cette phase, le design de la machine et le choix des matériaux sont analysés en fonction de la puissance et de l'emplacement. C'est dans cette phase que le cycle de vie du produit est utilisé pour évaluer le coût global de possession de l'éolienne. Les organes principaux comme la génératrice et les multiplicateurs sont dimensionnés. Généralement, le prototype a un coût beaucoup plus élevé qu'une machine produite en série car les pièces sont achetées à l'unité. Mais il est donc important de prendre en compte dans le calcul du Life Cycle Cost, le nombre de machines produites en série, pour pouvoir évaluer un coût de développement par machine fabriquée. En moyenne cette phase représente 3 % du coût global de cycle de vie de l'éolienne.

## **2.2. La Fabrication**

La fabrication est la phase du cycle de vie de l'éolienne qui représente la plus grande part. Elle comprend de nombreux et différents coûts. Généralement, le coût lié à cette phase est assez simple à définir à partir du coût des données issues de la conception. Concernant l'industrialisation, le coût le plus important, à ce stade, est lié à l'assemblage de la nacelle qui se fait en usine. En effet, la tour et les pâles sont assemblés directement sur le site pour des questions de transport. Il est important de rappeler que, la majeure partie du coût de fabrication est due au prix des pièces qui constituent l'éolienne (génératrice, gearbox, tour,...).

Les principaux composants de la nacelle sont la gearbox, la génératrice, l'arbre rapide, la base (sol), les armoires électriques et le capot de la nacelle.

Le coût de fabrication inclue également ceux des différents éléments:

- La tour: Il est fonction de la hauteur qui peut aller de 59 à 100 m
- Le hub: roulement de chaque pale - les trois moteurs- les batteries - le contrôleur.
- Le transformateur en fonction s'il est installé dans la base de la tour, ou en dehors.
- Les fibres utilisées pour le SCADA (réseau qui permet la communication des machines entre elles, et vers l'extérieur)
- La fondation

Ce processus d'évaluation des coûts répond aux exigences de la norme International IEC 60300.

En synthèse, cette phase représente 52 % du coût global de cycle de vie de l'éolienne. Il est le paramètre le plus influent dans le calcul du retour sur investissement, sachant qu'actuellement l'espérance de fonctionnement normal d'une éolienne est estimée à 20 ans.

### 2.3. L'Installation

La phase d'installation d'une éolienne prend en compte les coûts de vente, de projet, de logistique, de montage et de mise en service de la machine. Il représente environ 12 % du coût global de cycle de vie de l'éolienne.

### 2.4. Exploitation

La partie O&M (Operations & Maintenance) représente une part difficile à évaluer du Life Cycle Cost d'une éolienne puisqu'il est estimé sur une durée de 20 ans dont la majeure des cas les données ne sont pas encore disponibles. En effet, ce coût englobe la maintenance préventive et curative. L'estimation des coûts de cette dernière est basée sur des modèles prédictifs et suivent des lois stochastiques dépendant de plusieurs paramètres tel que les évolutions des températures, des degrés d'ergométrie sur le site ainsi que les vitesses des vents.

Cette partie représente le cœur de nos investigations. En particulier l'évaluation des coûts liés à la maintenance qui représentent la partie indéterministe des coûts d'exploitation. Pour ce faire, nous nous sommes servis de données expérimentales issues de différents parcs d'éoliennes installés en France et en Belgique, ce qui représente environ 208 machines réparties sur 35 parcs. Ces parcs sont homogènes de puissance 2MW ayant en moyenne un historique de données allant de 1 an à 5 ans comme le montre le Tableau 1 (Historique des données d'exploitation).

Tableau 1

<b>Année</b>	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans
<b>Nombre de Turbines</b>	208	149	95	53	26
<b>Nombre de Parcs</b>	35	25	15	9	4

A partir de données récoltées sur 5 ans, des indicateurs tel que le MTBF (Mean Time Between Failure), le MTTR (Mean Time To

Repair) ou encore le taux de défaillance ont pu être calculés. A partir de toutes ces informations, mises en parallèles avec les données constructeurs et le retour d'expérience des pays ayant plus de recul dans le domaine, une estimation un coût de la maintenance curative a été obtenu.

Les premiers résultats de nos analyses montrent que le taux de défaillance décroît très rapidement pour se stabiliser à partir de six mois de fonctionnement. Le nombre d'heures d'arrêt est très corrélé avec ce taux. Cet historique sur cinq ans nous a permis également d'évaluer le MTTR (Mean time between failures) sur les convertisseurs. Ce paramètre influent dans l'estimation de la production d'énergie et du coût d'exploitation a une tendance décroissante quasiment linéaire.

La phase exploitation d'une éolienne représente environ 32 % de son coût globale. Elle ne peut donc pas être négligée, mais il est difficile de faire diminuer le coût de cette phase car l'état général de l'éolienne et en rapport direct avec sa production. Si on ajoute à ces différents coûts celui du démantèlement qui représente environ 1 % du LCC on obtient une répartition des coûts pour chacune des phases comme le montre la Figure 2.

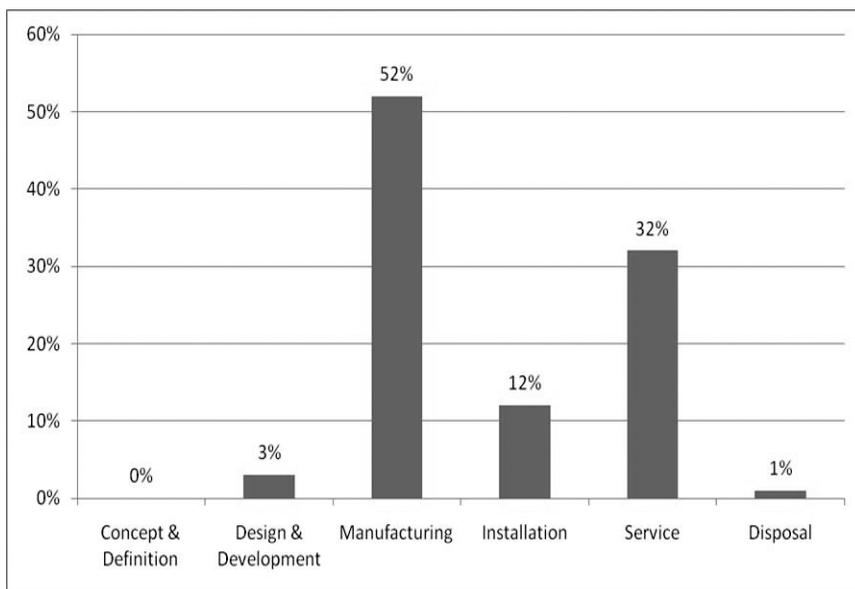


Figure 2 Répartition des coûts du LCC

### 3. Conclusion

■ Dans le cas de l'intégration des sources d'énergies renouvelables, le calcul du LCC est considéré comme étant le meilleur moyen pour évaluer l'impact sur l'environnement. Le Life Cycle Cost d'une éolienne peut se décomposer en six parties: la conception, le développement, la fabrication, l'installation, l'exploitation et le démantèlement.

■ Le travail que nous avons présenté dans cet article est une contribution à l'évaluation des coûts d'exploitation d'un parc d'éoliennes de 2MW qui représentent la partie indéterministe dans le calcul du LCC. Une base de donnée issue de 5 ans de fonctionnement de 208 éoliennes réparties sur 35 parcs a servie à donner une première prévision de la répartition des coûts de revient de chaque éolienne et a définir les tendances temporelles des MTBF et MTTR.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] Elsam Engineering, *Life Cycle Assessment of offshore and onshore sited wind farms*, Fredericia (Danemark), mars, 2004.
- [2] Barbara Batumbya Nalukowe, Jianguo Liu, Wiedmer Damien, Tomasz Lukawski, *Life Cycle Assessment of a Wind Turbine*, Rapport. May 22, 2006.
- [3] Brice Tremeac and Francis Meuniera, *Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 W wind turbines*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 13, Issue 8, October 2009, pag. 2104-2110,2009.

Ing. Alexis LUGAND

Laboratoire IRISE, Ecole d'ingénieurs CESI, centre de Rouen

e-mail: lugand.alexis@orange.fr

Prof.Dr. Bélahcène MAZARI

Laboratoire IRISE, Ecole d'ingénieurs CESI, centre de Rouen

e-mail: bmazari@cesi.fr

Prof.Dr. Farid BAGUI

Laboratoire IRISE, Ecole d'ingénieurs CESI, centre de Rouen

e-mail: fbagui@cesi.fr

Prof. Dr. Khalil KASSMI

Laboratoire LETAS, Oujda, Maroc Université Mohamed Premier, ENSA

e-mail: khkassmi@yahoo.fr