

## Optimisation de la micro-localisation des aérogénérateurs dans un parc éolien

S. Zergane et A. Smaïli \*

Département de Génie Mécanique, Ecole Nationale Polytechnique  
10, Avenue Hassen Badi, B.P. 182, El Harrach, Alger, Algérie

(reçu le 10 Juillet 2011 – accepté le 25 Décembre 2011)

**Résumé** - Dans un parc éolien, il est bien connu que la performance globale du parc est fortement liée aux types d'arrangement des aérogénérateurs dans le site. Un arrangement trop dense entraînerait des pertes considérables de puissance. Dans ce contexte, intervient notre travail, pour déterminer la micro-localisation optimale des éoliennes dans un parc et minimiser l'effet dû aux interférences de sillages des éoliennes. Pour ce faire, nous proposons un modèle numérique, basé sur la description linéaire du sillage, et la méthode d'optimisation de Monte Carlo, afin d'étudier la micro-localisation optimale des turbines en fonction des caractéristiques aérodynamiques et des espacements entre les turbines. La validité des résultats de simulation a été étudiée en utilisant les données expérimentales de NREL.

**Abstract** - In a wind farm, it is well known that the overall performance of the park is closely linked to the types of arrangement of the turbines on the site. Too dense an arrangement would result in considerable loss of power. In this context, our work is involved, to determine the optimal micro location of turbines in a park and minimize the effect due to interference of wakes of wind turbines. To do this, we propose a numerical model based on the linear description of the wake, and the optimization method of Monte Carlo, to study the optimal micro-location of turbines based on aerodynamic characteristics and spacing between the turbines. The validity of simulation results was investigated using experimental data from NREL.

**Mots clés:** Aérogénérateur - Energie éolienne - Méthode de Monte Carlo - Optimisation - Parc éolien.

### 1. INTRODUCTION

Le développement de l'énergie éolienne, suite à la surexploitation du pétrole et du gaz naturel dans ces dernières décennies, suscite la promotion et l'installation des parcs éoliens dans plusieurs pays à travers le monde, pour réduire les émissions de gaz carbonique qui sont les premiers responsables de l'effet de serre.

D'ailleurs, le taux de croissance de l'énergie éolienne dans le monde est de l'ordre de 30 % par an depuis les années 2000. L'utilisation des aérogénérateurs dans des parcs éoliens, est l'un des moyens les plus écologiques pour l'obtention de l'énergie électrique de manière propre et durable. Cependant leurs rendements dépendent essentiellement de leurs emplacements dans le parc éolien.

Sous l'effet du sillage, des réductions importantes de la vitesse du vent peuvent être notées, également la puissance produite dans la zone en aval de la turbine. Dans cet objectif, nous présentons un travail qui vise directement la micro-localisation optimale des turbines, basée sur la description numérique du sillage et la méthode d'optimisation

---

\* arezki.smaili@enp.edu.dz

de Monte Carlo en fonction des caractéristiques aérodynamiques et des espacements entre les turbines.

## 2. LE MODELE DU SILLAGE

Un modèle plus simple illustre les caractéristiques du sillage (Fig. 1) développé par Jensen [2] en 1986, prévoit que le sillage résultant en aval d'une éolienne, se propage linéairement. Son rayon  $r$  est donné par la relation suivante:

$$r = k x + r_0 \quad (1)$$

où,  $k$  est une constante dite d'entraînement, dépendant de la hauteur de l'éolienne  $Z$  et de la rugosité du sol  $Z_0$ , donnée par la relation [3].

$$k = \frac{0.5}{\ln(Z/Z_0)} \quad (2)$$

En se basant sur le modèle idéal de Betz, et en supposant la conservation de la quantité de mouvement, on obtient l'expression de la vitesse du vent,  $U_x$ , à une distance  $x$  en aval de la turbine comme suit:

$$\frac{U_x}{U_0} = 1 - a_x \quad (3)$$

où,

$$a_x = \frac{(1 - \sqrt{1 - C_T})}{(r/r_0)^2} \quad (4)$$

avec  $C_T$  est le coefficient de poussée.

Pour le cas d'une éolienne affectée par des sillages de différentes turbines en amont, le sillage résultant à une position  $x$ , est décrit par la relation de la superposition suivante [4]:

$$(a_x)_{\text{total}}^2 = \sum_{i=1}^{N_{\text{éol}}} (a_x)_i^2 \quad (5)$$

où,  $N_{\text{éol}}$  est le nombre total des éoliennes dans le parc.

Donc, la vitesse à une distance  $x$  en aval d'une éolienne, peut se réécrire de la façon suivante:

$$U_x = U_0 \times \left[ 1 - \frac{r^2 (1 - \sqrt{1 - C_T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{éol}}} (r_0 + k x)^4}} \right] \quad (6)$$

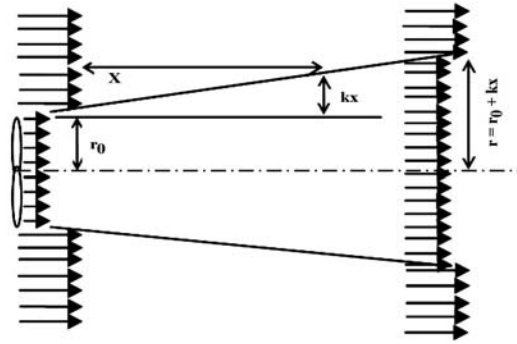


Fig. 1: Le modèle du sillage

### 3. PROCEDURE D'OPTIMISATION

#### 3.1 La méthode de Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo a été introduite par Neumann, Ulam et Metropolis à la fin de la seconde guerre mondiale, lors des recherches sur la fabrication de la bombe atomique, comme clé efficace pour la simulation d'étude des systèmes de particules en interaction, et dans la physique de la matière condensée [5].

Il n'y a pas un consensus absolu sur une définition précise de ce qu'est une technique de type Monte Carlo, la description la plus habituelle consiste à dire que les méthodes de ce types, se caractérisent par l'utilisation du hasard pour résoudre des problèmes de nature numériques.

Cette méthode consiste à tirer à chaque itération une solution au hasard. La fonction objectif,  $f$ , est évaluée en ce point.

Les processus continus pour plusieurs itérations correspondent aux évaluations ( $f_1, f_2, f_3, f_4, \dots$ ). La solution du problème est la meilleure évaluation de la fonction objectif.

Dans un parc éolien, plusieurs arrangements des turbines sont donnés aux hasards. La puissance totale est évaluée à chaque arrangement. La solution de la micro-localisation optimale correspondant à la puissance maximale [6].

#### 3.2 Espacement entre les turbines

Les turbines à installer dans le parc, est de type NREL dont les caractéristiques sont données par le **Tableau 1**.

**Tableau 1:** Caractéristiques de la turbine NREL

Longueur de la pale ( R )	5.03 m
Hauteur du rotor ( Z )	17 m
Coefficient de poussée ( $C_T$ )	0.256
Vitesse de rotation	72 tr/min

La courbe de la puissance de la turbine est illustrée dans la figure 2, dont l'expression est donnée comme suit:

$$P = \left(-6.674 U^3 + 121.885 U^2 + 455.395 U - 10654.967\right) \times 10^{-3} \quad (7)$$

Dans un premier lieu, on procède à l’optimisation des espacements transversal et longitudinal du parc.

Pour ce faire, on considère un parc éolien divisé en 100 cases identiques pour 100 turbines, de type NREL phase III. Les dimensions de chaque case sont  $RJ \times RI$  (soit les dimensions du parc  $10RJ \times 10RI$ ) (Fig. 3).

Pour la vitesse du vent, uniforme en grandeur et en direction, soit une valeur de 12 m/s, la puissance du parc résultante sans effet de sillage,  $P_{SES}$  est de 1301.3 kW. On fait varier le nombre  $J = 10$  à 5, ( $J = 10, 9, 8, 7, 6, 5$ ), alors que le nombre  $I$  est maintenu constant ( $I = 10$ ). Ensuite, on en inverse.

### 3.3 Micro-localisation optimale

Après plusieurs itérations de 30 turbines sur un parc de 100 cases, selon la méthode de Monte Carlo, chaque arrangement aléatoire correspond à une puissance de parc donnée. La micro-localisation optimale, est basée sur la configuration qui correspondant à la puissance maximale des 30 turbines, distribuées de façon aléatoire sur 100 cases du parc.

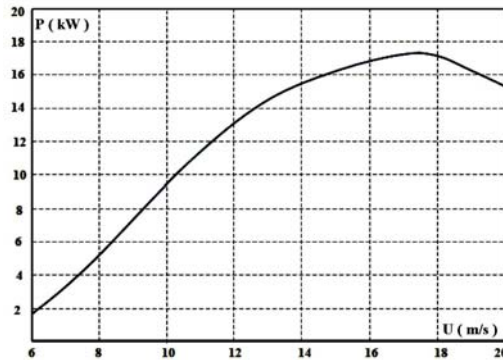


Fig. 2: Courbe de puissance de la turbine NREL

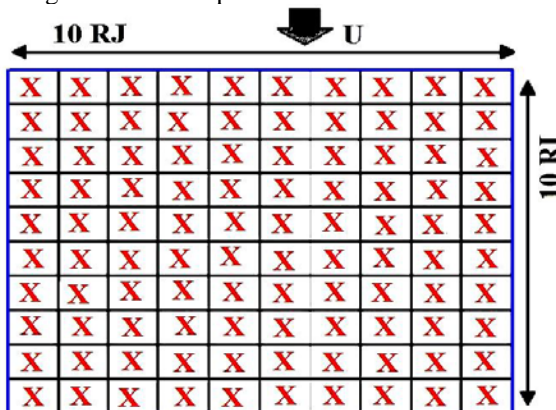


Fig. 3: Dimensionnement d’un parc

**Tableau 2:** Effet d'espacement transversal

( I × J )	P ( kW )	$\Delta P / P_{SES}$ (%)
10 × 10	1231.7	5.27
10 × 9	1232.6	5.27
10 × 8	1232.5	5.29
10 × 7	1232.3	5.29
10 × 6	1232.3	5.30
10 × 5	1231.1	5.38

#### 4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Comme illustre le tableau 2, le sillage ne semble pas affecter l'espacement transversal qu'à partir de la valeur  $J = 8$ , où les valeurs de puissance sont pratiquement constantes.

Sur l'espacement longitudinal, comme nous montre le **Tableau 3**, le sillage est beaucoup plus important, où on note des différences notables sur la puissance entre chaque variation de  $I$ . Par conséquent, les dimensions optimales d'une case s'avèrent correspond aux valeurs  $I = 10$  et  $J = 8$ .

Pour déterminer l'emplacement optimal des aérogénérateurs dans le parc, les dimensions optimales transversale et longitudinale entre les turbines calculées, sont utilisées dans la micro-localisation, ainsi que les données expérimentales de la turbine NREL. Les centres des cases sont considérés pour être pourvu de 30 turbines éoliennes distribuées d'une façon aléatoire dans le parc.

**Tableau 3:** Effet d'espacement longitudinal

( I × J )	P ( kW )	$\Delta P / P_{SES}$ (%)
10 x 10	1231.7	5.27
9 x 10	1226.0	5.78
8 x 10	1217.8	6.40
7 x 10	1207.7	7.17
6 x 10	1194.8	8.18
5 x 10	1177.9	9.48

La vitesse du vent est constante et égale à 12 m/s sur la première rangée du parc. Par l'effet du sillage, un déficit de l'énergie cinétique du vent affecte le reste des turbines du parc à partir de la deuxième rangée. Donc, la capacité maximale de production de puissance, dans tout le parc, est inférieure à celle produite par tous les aérogénérateurs sans effet de sillage. La puissance d'une seule éolienne est estimée à une puissance totale de 13.01 kW, ce qui donne pour les 30 éoliennes du parc, une puissance totale de 390.39 kW.

L'application de la méthode de Monte Carlo permet ainsi de déterminer un arrangement prometteur des aérogénérateurs dans un parc donné, maximisant la puissance, et minimisant les interférences des sillages entre les aérogénérateurs. Pour un nombre d'itérations, 6000 nombres de distributions aléatoires possibles dans un parc de 30 aérogénérateurs, la distribution qui offre une puissance maximale de 380.739 kW s'avère la plus optimale. La figure 4 montre la configuration d'un tel arrangement ou

d'une distribution aléatoire. Ces résultats ont montré une bonne concordance avec ceux de Marmidis *et al.* [7].

X	X		X	X		X			
X		X					X	X	
	X						X		
		X	X					X	
			X	X					
	X							X	
	X	X	X			X	X		
					X				X
X							X	X	
					X				X

Fig. 4: Distribution optimale des aérogénérateurs dans un parc

#### 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Nous avons présenté une méthode d'optimisation de la micro-localisation des aérogénérateurs dans un parc éolien, en se basant sur la modélisation des sillages et l'application de l'approche de Monte Carlo.

Pour étudier la validité de la méthode, la turbine NREL a été considérée. Les résultats obtenus ont montré de bonne concordance avec ceux de la littérature [7].

Comme perspective à la présente étude, il s'agit de développer un modèle plus détaillé qui, d'une part, tient compte des effets instationnaires et des variations de l'orientation de la vitesse du vent, ainsi que de la turbulence atmosphérique; et qui, d'autre part, considère l'écoulement autour de tous les composants de l'éolienne (rotor, nacelle, tour).

#### REFERENCES

- [1] J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers, '*Wind Energy Explained, Theory, Design and Application*', John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [2] N.O. Jensen, '*A Note of Wind Generator Interaction*', Roskilde, Denmark: Riso National Laboratory, 1993.
- [3] G. Moseti, C. Poloni and B. Diviacco, '*Optimization of Wind Turbine Positioning in Large Wind Farm by Means of a Genetic Algorithm*', Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 51, N°1, pp. 105 – 116, 1995.
- [4] A. Smaïli, '*Energie Eolienne*', Notes de Cours, PGS Economie d'Énergie, ENP, 2009.
- [5] M. Hayoun, '*La Méthode de Monte Carlo Metropolis*', Ecole Polytechnique, Laboratoire des Solides Irradiés, Jussieu, Paris, 2002.
- [6] B. Démidovitch et I. Maron, '*Élément de Calcul Numérique*', Edition MIR Moscou, 1979.
- [7] G. Marmidis, S. Lazarou and E. Pyrgioti, '*Optimal Placement of Wind Turbines in Wind Park Using Monte Carlo Simulation*', Renewable Energy, Vol. 33, N°7, pp. 1455 – 1460, 2008.