

## Etude d'un Procédé Thermique de Dessalement d'Eau de Mer par Aérogénérateur à Rendement Elevé

L. Merad, B. Benyoucef, Lo. Merad, T. Boussoukaia, B. Omari

Laboratoire de Matériaux et des Energies Renouvelables  
Université Abou Bakr Belkaid B.P : 119 Tlemcen 13000 Algérie

**Résumé** - Le problème de l'eau potable se posant de façon aiguë sur notre planète, et particulièrement dans notre pays a engendré le développement des techniques de dessalement d'eau de mer qui soient économiques, plus fiables et protectrice de l'environnement. D'ailleurs, 1.4 milliards d'habitants ne possèdent pas d'eau potable alors que les océans représentent 97% de l'eau de la planète. Plusieurs procédés de dessalement de l'eau de mer ont été utilisés, le plus simple étant la distillation de l'eau de mer, les sels étant non volatils. Dans notre cas, nous avons effectué une simulation numérique du procédé thermique de dessalement de l'eau de mer, l'alternateur étant alimenté en énergie électrique par aérogénérateur rapide tripale et de 25 mètres de hauteur. L'installation comprend un compresseur, une pompe et un échangeur de chaleur dans lequel l'eau de mer est préchauffée et un évaporateur. La vapeur d'eau produite est comprimée par le compresseur entraîné par l'alternateur et ce, après élimination des gouttelettes d'eau. La pression étant très grande, la vapeur d'eau se condense à une température supérieure à celle régnant dans l'évaporateur ceci étant dû à la chaleur latente de condensation. Néanmoins, ce procédé présente quelques inconvénients tels que l'entartrage de l'échangeur et la corrosion des appareils. D'autre part, ce procédé permet l'alimentation en eau potable tout en préservant l'environnement car l'énergie électrique nécessaire est d'origine éolienne en plus d'une consommation plus faible.

**Abstract** - the difficulty of drinking water arising in an acute way on our planet, and particularly in our country generated the development of the techniques of desalination of sea water which are economic, more reliable and protective of the environment. Moreover, 1.4 billion inhabitants do not have drinking water whereas the oceans account for 97% of the water of planet. Several processes of desalination of sea water were used, simplest being the distillation of sea water, salts being non-volatile. In our case, we carried out a digital simulation of the thermal process of desalination of sea water, the alternator being fed in electric power by three-bladed fast aero generator and L' installation 25 meters height includes/understands a compressor, a pump and an exchanger of heat in which the sea water is preheated and an evaporator. The produced water vapour is compressed speaks compressing pulled by the alternator and this, after elimination of the water droplets. The pressure being very large, the water vapour condenses at a temperature higher than that reigning in the evaporator this being due to the latent heat of condensation. Nevertheless, this process presents some disadvantages such as the scaling of the exchanger and the corrosion of different apparatuses D' leaves, this process allows the drinking water supply while preserving the environment because the electric power necessary is of wind origin in addition to one lower consumption.

**Mots clés** : Dessalement, aérogénérateur, transfert de chaleur, Environnement, compression mécanique de vapeur.

### 1. INTRODUCTION

Le développement d'un pays dans les secteurs économique, social et démographique nécessite des besoins de plus en plus grands en énergie. Pour cela, il faut exploiter les différents types d'énergie pour répondre de manière efficace à la demande surtout eau potable.

Notre étude est menée pour quantifier la puissance énergétique disponible et la densité de puissance moyenne annuelle récupérable sur le site de TLEMCEN ainsi l'étude du procédé thermique de dessalement d'eau de mer par compression mécanique de vapeur, et ce en s'appuyant sur le modèle mathématique de la distribution de WEIBULL. Tout système de conversion de l'énergie éolienne fonctionne dans des conditions optimales après avoir été dimensionné selon les caractéristiques du site. Les paramètres qui caractérisent un aérogénérateur sont la puissance nominale  $P_n$ , la vitesse de démarrage  $V_d$ , la vitesse nominale  $V_n$ , et sa vitesse de coupure  $V_c$ . L'estimation de la puissance moyenne annuelle de sortie d'un aérogénérateur à partir de la loi de distribution de WEIBULL permet d'apprécier les possibilités d'alimentation des locaux des sites isolés en eau potable tous en préservant l'environnement ainsi un coût de revient moins cher par un procédé de dessalement d'eau de mer qui est la compression mécanique de vapeur..

## 2. MODELISATION MATHÉMATIQUE

La distribution de WEIBULL nous renseigne sur la répartition de la vitesse du vent (vitesse moyenne, vitesse cubique moyenne et la densité de probabilité de la vitesse du vent).

Généralement les vitesses du vent sont mesurées à une hauteur de 10 mètres **a.d.s** (au **d**essus du **s**ol) et ce dans les stations de l'**ONM** (Office **N**ational de la **M**étéorologie).

La pression variant à chaque instant, on observe des fluctuations de la vitesse du vent qui sont amplifiées par le phénomène de turbulence.

Le modèle mathématique de WEIBULL est caractérisé par les paramètres de forme  $k$  et d'échelle  $C$ . La densité de probabilité de la puissance s'écrit sous la forme suivante :

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \cdot \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right] \quad (1)$$

Pour déterminer les caractéristiques de la vitesse du vent à des hauteurs supérieures à 10m a.d.s on procède à l'extrapolation verticale des paramètres de WEIBULL, en utilisant la méthode de JUSTUS [1, 2, 3] qui donne la loi de puissance modifiée par le facteur d'échelle  $C_1$  et de forme  $k_1$  a 10.mètres a.d.s  $C_2$  et  $k_2$  a 25 mètres a.d.s.

$$C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^{ak} \quad \text{où} \quad ak = \frac{1}{\ln\left(\frac{\sqrt{Z_1 \cdot Z_2}}{Z_0}\right)} - 0.0881 \cdot \ln\left(\frac{C_1}{6}\right) \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{k_1}{\left[1 - 0.0881 \cdot \ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)\right]} \quad (3)$$

La vitesse moyenne du vent est donnée par la distribution de WEIBULL [4] :

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} f(V) \cdot dV = C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4)$$

Où  $\Gamma$  est la fonction GAMMA. La fonction GAMMA est définie par la relation suivante :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) \cdot t^{x-1} \cdot dt \quad (5) \text{ avec } x > 0$$

La vitesse cubique moyenne du vent est donnée par la relation suivante :

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 \cdot f(V) \cdot dV = C^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (6)$$

## 3. PUISSANCE MOYENNE ANNUELLE FOURNIE PAR UN AEROGENERATEUR

Chaque système de conversion d'énergie éolienne est caractérisé par [4, 5] :

- La vitesse de démarrage (Puissance nulle).
- La vitesse nominale ou maximale (puissance maximale).
- La vitesse de coupure (puissance constante, pour éviter la détérioration du matériel si la vitesse augmente).

La puissance moyenne annuelle fournie par un aérogénérateur est donnée sous la forme suivante :

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(V) \cdot f(V) \cdot dV \quad (7)$$

La variation de la puissance utile fournie est exprimée à l'aide, du système d'équations suivant, appelé aussi loi quadratique [4, 5].

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{si } V < V_d \\ \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot V + \mathbf{g} \cdot V^2 & \text{si } V_d < V < V_n \\ P_n & \text{si } V_n < V < V_c \\ 0 & \text{si } V > V_c \end{array} \right. \quad (8)$$

Avec  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  et  $\mathbf{g}$  déterminés par les conditions suivantes :

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot V_d + \mathbf{g} \cdot V_d^2 = 0 \\ \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot V_n + \mathbf{g} \cdot V_n^2 = P_n \\ \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot (V_d + V_n) + \mathbf{g} \cdot (V_d + V_n)^3 = P_n \cdot \left( \frac{(V_d + V_n)}{V_n} \right)^3 \end{array} \right\} \quad (9)$$

L'intégrale (7) va s'écrire en premier lieu sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \bar{P} = & \int_{V_d}^{V_n} (\mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot V + \mathbf{g} \cdot V^2) \cdot \frac{k_1}{C_1} \cdot \left( \frac{V}{C_1} \right)^{k_1-1} \cdot \exp \left( - \left( \frac{V}{C_1} \right)^{k_1} \right) \cdot dV + \\ & \underbrace{\int_{V_n}^{V_c} P_n \cdot \frac{k_1}{C_1} \cdot \left( \frac{V}{C_1} \right)^{k_1-1} \cdot \exp \left( - \left( \frac{V}{C_1} \right)^{k_1} \right) \cdot dV}_{I_2} \end{aligned}$$

L'intégrale  $I_2$  :

$$\begin{aligned} I_2 = & \int_{V_n}^{V_c} P_n \cdot \frac{k_1}{C_1} \cdot \left( \frac{V}{C_1} \right)^{k_1-1} \cdot \exp \left( - \left( \frac{V}{C_1} \right)^{k_1} \right) \cdot dV \quad \text{s'écrit sous la forme} \\ I_2 = & P_n \cdot [F(V_c) - F(V_n)] \end{aligned} \quad (10)$$

Enfin l'intégrale (7) s'écrit sous la forme suivante :

$$\bar{P} = \int_{V_d}^{V_n} (\mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot V + \mathbf{g} \cdot V^2) \cdot \frac{k_1}{C_1} \cdot \left( \frac{V}{C_1} \right)^{k_1-1} \cdot \exp \left( - \left( \frac{V}{C_1} \right)^{k_1} \right) \cdot dV + P_n \cdot \left[ \exp \left[ - \left( \frac{V_n}{C_1} \right)^{k_1} \right] - \exp \left[ - \left( \frac{V_c}{C_1} \right)^{k_1} \right] \right]$$

Le deuxième terme de l'intégrale se calcule plus facilement tandis que le premier terme par contre plus complexe nécessite une résolution par une méthode d'intégration numérique de Simpson.

### 3.1. Facteur de puissance

Le facteur de puissance d'un système de conversion de l'énergie éolienne [5, 6] **WECS** (Wind Energy Conversion System) est donné par l'équation suivante :

$$F_p = \left( \frac{\bar{P}}{P_n} \right) \quad (11)$$

#### 4. DESSALEMENT D'EAU DE MER PAR COMPRESSION MECANIQUE DE VAPEUR

Le principe du dessalement d'eau de mer par compression mécanique de vapeur est celui d'une pompe à chaleur ; ou l'eau de mer est évaporée après avoir été préchauffée dans un échangeur récupérateur de chaleur. La vapeur d'eau produite est comprimée après être débarrassée des gouttelettes entraînées par un séparateur. Sa pression ayant été élevée, la vapeur se condense alors à une température supérieure à la celle qui règne dans l'évaporateur ; grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée, le cycle d'évaporation et de condensation peut ainsi fonctionner. La vapeur condensée de l'eau douce est extraite, ainsi que la saumure concentrée contenant le sel. A cause des problèmes de corrosion et d'entartrage des composants, un tel dispositif fonctionne généralement à une température limitée à environ 60° C (l'eau de mer bout sous un vide partiel) avec un facteur de concentration égal à deux : 1m<sup>3</sup> d'eau de mer (35 g/l de sel) donnera 500 l d'eau douce et 500 l de saumure à 70 g/l de sel seront rejetés à la mer. Ce dispositif permet de ne consommer qu'une dizaine de kilowattheures électriques au lieu des 700 Kwh Thermiques d'une simple distillation alors que notre aérogénérateur fournit une puissance moyenne annuelle de 10303Kwh/an pour alimenter les14 foyers en eau potable.

#### 5. RESULTATS ET INTERPRETATION

La distribution de WEIBULL correspondant au site de TLEMCEN (Zone Aéroport), figure (1) montre que la densité de distribution atteint un maximum pour une certaine vitesse du vent de l'ordre de 3m/s puis elle décroît au fur et à mesure que la vitesse augmente jusqu'à s'annuler complètement ; c'est le paramètre  $k$  qui caractérise la dissymétrie et l'allure de la distribution.

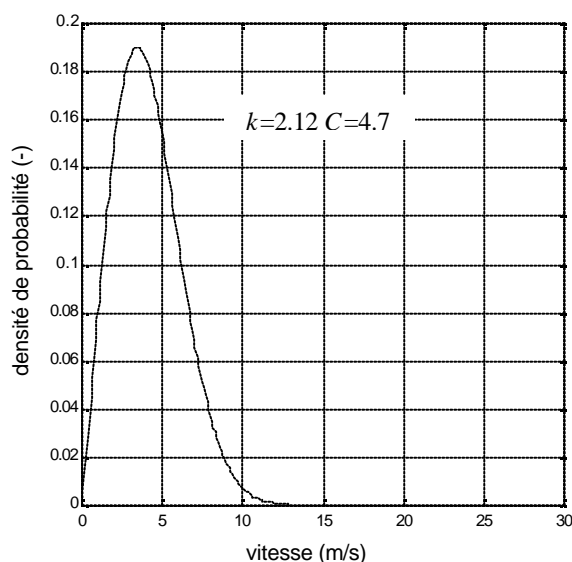


Fig. 1 : Distribution de WEIBULL. Site de Tlemcen (Aéroport) à 10m a.d.s

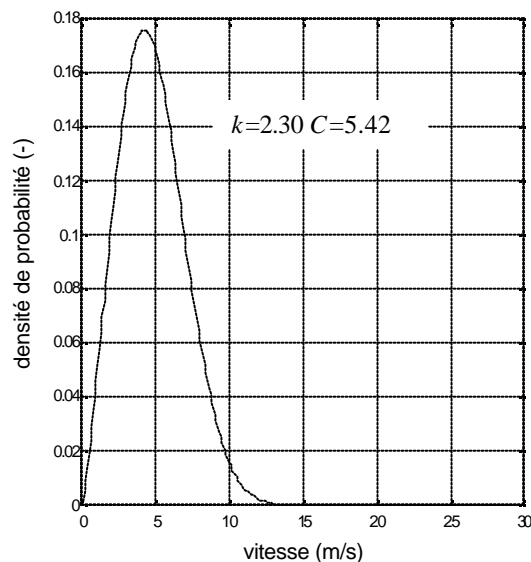


Fig. 2 : Distribution de WEIBULL. Site de Tlemcen (Aéroport) à 25m a.d.s

La distribution de WEIBULL correspondant au site étudié à 25 mètres a.d.s, figure (2) pour les paramètres mentionnés au Tableau (1 et 2) a la même allure que celle à 10 mètres a.d.s mais elle s'annule pour une vitesse de vent plus grande par rapport au premier cas, d'où l'intérêt d'étudier la distribution à des hauteurs plus élevées. Le tracé de la variation de la puissance en fonction de la vitesse du vent, montre que les vitesses de démarrage  $V_d$ , nominale  $V_n$  et de coupure  $V_c$  sont respectivement les vitesses à partir desquelles l'aérogénérateur commence à fournir de l'énergie, à laquelle il atteint sa puissance nominale ou maximale et s'arrête pour éviter des dommages matériels.

Tableau 1 : Caractéristiques du site à 10 mètres a.d.s

Site	$k_1$ [—]	$C_1$ [m/s]	$\bar{V}_1$ [m/s]	$\langle V_1^3 \rangle$ [m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> ]
Tlemcen	2,12	4,70	4,16	130,82

**Tableau 2** : Caractéristiques du site à 25 mètres a.d.s

Site	$k_2$ [—]	$C_2$ [m/s]	$\bar{V}_2$ [m/s]	$\langle V_2^3 \rangle$ [m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> ]
Tlemcen	2,30	5,42	4,80	187,07

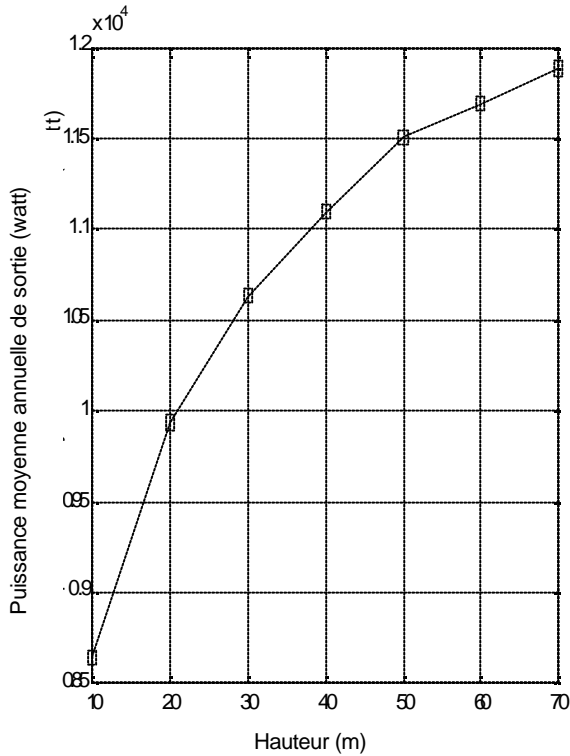


Fig. 3 : Variation de la puissance fournie par l'aérogénérateur en fonction de la hauteur

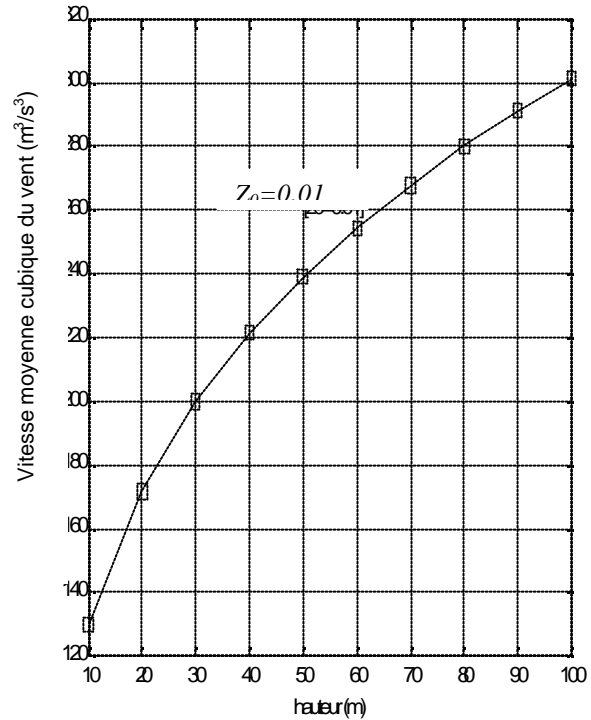


Fig. 4 : Variation de  $\langle V^3 \rangle$  en fonction de la hauteur

L'évolution du facteur de puissance et la puissance moyenne annuelle fournie par l'aérogénérateur figure (3) augmentent avec la hauteur parce que le gisement éolien est important à es hauteurs plus élevées.

Les résultats montrent que la puissance moyenne annuelle fournie augmente avec la hauteur. De ce fait, le nombre de foyers alimentés en eau potable sera plus important [8, 9, 10].

## 6. CONCLUSION

Notre étude montre que le potentiel énergétique éolien récupérable sur le site de TLEMCCEN (Aéroport) atteint les 425,165kWh/m<sup>2</sup>.an à 10 mètres a.d.s. En effet l'assymétrie de la distribution entraîne une variation particulière de chaque site. L'extrapolation verticale des paramètres de WEIBULL renseigne sur la densité de puissance moyenne annuelle récupérable à des hauteurs plus élevées ; pour notre cas à une hauteur de 25 mètres a.d.s, cette densité avoisine les 607,99kWh/m<sup>2</sup>.an. Donc pour tout dimensionnement d'un aérogénérateur il est impératif de passer par l'étude statistique du site considéré. Ainsi l'alimentation en eau potable par le dessalement d'eau de mer à compression mécanique de vapeur en utilisant un maximum de matériaux polymères ayant un excellent rendement face au problème de la corrosion et à l'encrassement, ainsi que les surfaces d'échange dans les échangeur récupérateur de chaleur et avoir un coût d'installation et des frais de maintenance faibles.

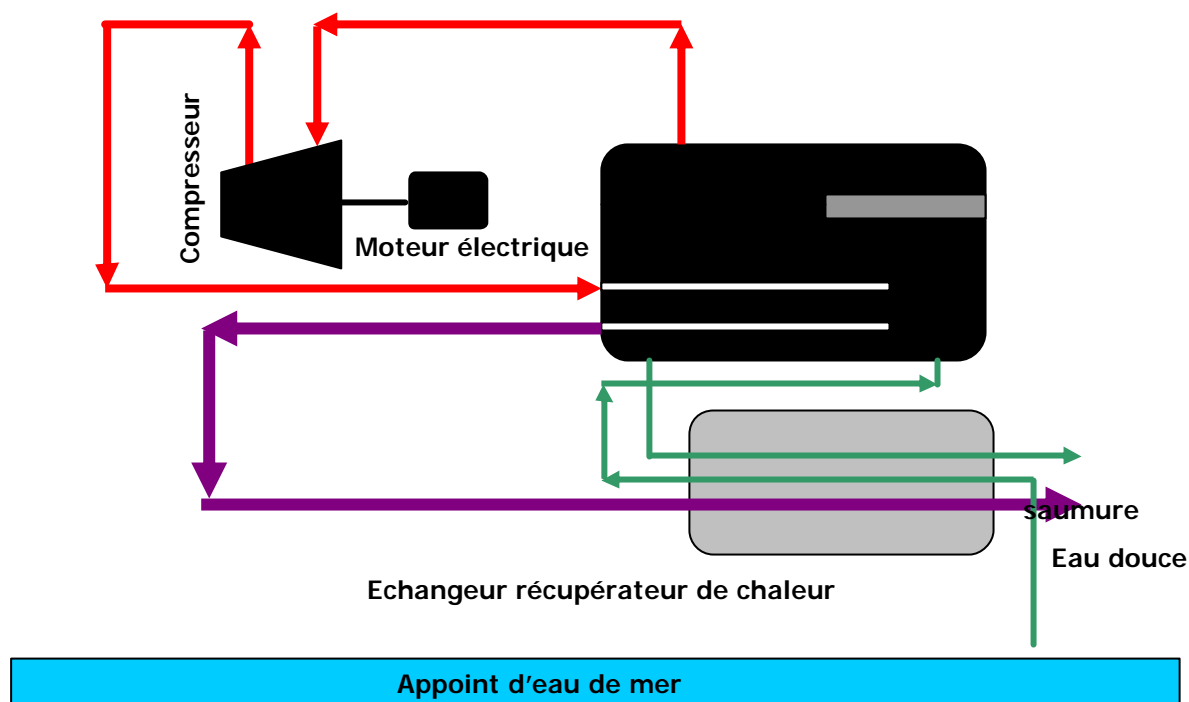


Fig. 5: Schéma principe de l'installation de dessalement d'eau de mer

### NOMENCLATURE

<b>a.d.s</b> : au dessus du sol.....[-]	$\bar{V}$ : Vitesse moyenne..... [m/s]
$C$ : Paramètre d'échelle..... [m/s]	$V_c$ : Vitesse de coupure..... [m/s]
$C_1$ : Paramètre d'échelle à 10m a.d.s.....[m/s]	$V_d$ : Vitesse de démarrage..... [m/s]
$C_2$ : Paramère d'échelle à hauteur..... [m/s]	$V_n$ : Vitesse nominale..... [m/s]
$k$ : Paramètre de forme..... [-]	$Z_0$ : Rugosité du sol..... [m]
$k_1$ : Paramètre de forme à 10m a.d.s..... [-]	$Z_1$ : Hauteur de référence..... [m]
$k_2$ : Paramètre de forme à hauteur désirée..... [-]	$Z_2$ : Hauteur désirée..... [m]
$P_n$ : Puissance nominale..... [Watt]	$f(V)$ : Densité de probabilité..... [-]
$\bar{P}$ : Puissance moyenne annuelle..... [Watt]	
$\Gamma$ : Fonction GAMMA..... [-]	

### REFERENCES

- [1] Feretic D., Tomsic Z., Cavlina N., « *Feasibility analisys of wind energy utilization in croatia* », Faculty of Electrical Engineering and computing, Department of power systems, Energy, Vol. 24, pp.239-246, Unska 3, 10000 Zagreb, Croatia, July 7, (1999).
- [2] Merad L., « *Contribution à l'étude d'un système d'aérogénérateur a rendement élevée Application au site de TLEMEN* », Thèse de Magister en Physique Energétique et Matériaux, Laboratoire de Matériaux et des Energies Renouvelables (L.M.E.R), Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Abou Bekr BELKAID de Tlemcen, Avril (2002).
- [3] Chou K.C., Cortis R.B., « *Simulation of hourly wind speed and array wind power* », Solar Energy, Vol. 26, N°3, pp. 199-212, Department of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, IL 60201 USA, November (1981).
- [4] Powell W.R., « *An analytical expression for the average output power of a wind machine* », Solar Energy, Vol. 26, N°2, pp. 77-80, Applied Physics Laboratory, John Hopkins University, John Hopkins Road, lawrel, MD 20810 U.S.A, July (1980).
- [5] Justus C.G., / traduit et adapté par Plazy J.L., « *Vent et performances des éoliennes* », édition S.C.M, Paris, (1982).

- [6] Lysen E.H., « *Introduction to Wind Energy* », edition S.W.D, 2<sup>ème</sup> edition the Netherlands, May (1983).
- [7] Pandey M.M., Chandra P., « Determination of optimum rated speeds of Wind machines for particular site », *Solar & Wind Technology*, Vol. 3, N°2, pp. 135-140, Central Institute of Agricultural Engineering, Bhopal, India, (1986).
- [8] Kasbadji N., Daaou H., « *Atlas énergétique éolien de l'Algérie* », 5<sup>ème</sup> Séminaire International sur la Physique Energétique, SIPE 5, Béchar, du 07 au 09 Novembre (2000).
- [9] Hasert U.F., Le goff H., Le goff P., « *Experimentation en milieu polaire : Dekrenkel à la terre Adélie* », Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt ITT, pp.83-87, Stuttgart, Allemagne, (2000).
- [10] Whitier P., « *Raffinage et génie chimique* », Deuxième édition, Tome II, Edition technip, Publication de l'Institut Français du pétrole, (1972).